

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA
OSTRAVA

Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra fyziky

**Výzkum významných proměnných při
soustružení AWJ**

**Investigation of significant variables for
AWJ turning**

OSTRAVA 2020

Bc. Adam Štefek

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Adam Štefek

Studijní program:

N0533A110006 Aplikovaná fyzika

Téma:

Výzkum významných proměnných při soustružení AWJ
Investigation of significant variables for AWJ turning

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Zpracovat kritickou rešerši dostupných pramenů se zadanou tematikou.
- 2) Navrhnout soubor významných proměnných ovlivňujících soustružení AWJ.
- 3) Zpracovat teoretické závislosti popisující vliv zvolených proměnných na kvalitu soustružení AWJ.
- 4) Navrhnout a realizovat experimenty zaměřené na potvrzení nebo modifikaci navrženého teoretického popisu.
- 5) Vyhodnotit výsledky experimentů ve vztahu k navržené teorii a navrhnout příslušné závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:

Srivastava, A.K., Nag, A., Dixit, A.R., Scucka, J., Hloch, S., Klichova, D., Hlavacek, P., Tiwari, S. Measurement, 131, 2019, 628-639. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.09.026

Srivastava, A.K., Nag, A., Dixit, A.R., Tiwari, S., Scucka, J., Zelenak, M., Hloch, S., Hlavacek, P. Surface integrity in tangential turning of hybrid MMC A359/B4C/Al2O3 by abrasive waterjet. Journal of Manufacturing Processes, 28, 2017, 11-20. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.05.017

Liu, D., Zhu, H.T., Huang, C.Z., Wang, J., Yao, P. Prediction model of depth of penetration for alumina ceramics turned by abrasive waterjet-finite element method and experimental study. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87(9-12), 2016, 2673-2682. DOI:10.1007/s00170-016-8600-x

Hlavacek, P., Carach, J., Hloch, S., Vasilko, K., Klichova, D., Klich, J., Lehocka, D. Sandstone Turning by Abrasive Waterjet. Rock Mechanics and Rock Engineering, 48(6), 2015, 2489-2493. DOI: 10.1007/s00603-015-0719-9

Liu, D., Huang, C.Z., Wang, J., Zhu, H.T., Yao, P., Liu, Z.W. Modeling and optimization of operating parameters for abrasive waterjet turning alumina ceramics using response surface methodology combined with Box-Behnken design. Ceramics International, 40(6), 2014, 7899-7908. DOI: 10.1016/j.ceramint.2013.12.137

Yue, Z.B., Huang, C.Z., Zhu, H.T., Wang, J., Yao, P., Liu, Z.W. Optimization of machining parameters in the abrasive waterjet turning of alumina ceramic based on the response surface methodology. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 71(9-12), 2014, 2107-2114. DOI: 10.1007/s00170-014-5624-y

Zohourkari, I., Zohoor, M., Annoni, M. Investigation of the Effects of Machining Parameters on Material

Removal Rate in Abrasive Waterjet Turning. Advances in Mechanical Engineering, 2014, Article Number: 624203. DOI: 10.1155/2014/624203

Li, W.Y., Zhu, H.T., Wang, J., Ali, Y.M., Huang, C.Z. An investigation into the radial-mode abrasive waterjet turning process on high tensile steels. International Journal of Mechanical Sciences, 77, 2013, 365-376. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.05.005

Manu, R., Babu, N.R. An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials. Wear, 266 (11-12), 2009, 1091-1097. DOI: 10.1016/j.wear.2009.02.008

Axinte, D.A., Stepanian, J.P., Kong, M.C., McGourlay, J. Abrasive waterjet turning-An efficient method to profile and dress grinding wheels. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 49(3-4), 2009, 351-356. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2008.11.006

Hlaváč, L.M., Palička, P.: Testing of parameters for turning by abrasive water jet. In Water Jetting, BHR Group, United Kingdom, 2006, p. 123 128.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Libor Hlaváč, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020




prof. Dr. RNDr. Jiří Luňáček
vedoucí katedry


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“



15.5.2020

Poděkování

Chtěl bych poděkovat prof. Ing. Liboru Hlaváčovi, Ph.D. za pomoc s měřením, a za rady a připomínky při tvorbě práce. Dále bych chtěl poděkovat kolektivu laboratoře metrologie Fakulty strojní VŠB-TUO, za umožnění měření drsnosti a kruhovitosti a podnětné rady. Práce vznikla za podpory projektu SGS SP 2020/45 Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Abstrakt

Diplomová práce se zaměřuje na problematiku soustružení pomocí abrazivního vodního paprsku. Blíže popisuje vliv několika parametrů procesu na množství ubraného materiálu. Zkoumána je i možnost soustružení jiných, než válcovitých tvarů vzorku. Experimenty jsou navrženy tak, aby bylo možno co nejlépe zmapovat průběh samotného obráběcího procesu a určit jeho významné proměnné. V práci jsou zavedeny nové veličiny, které mají usnadnit pochopení procesu. Jsou zhodnoceny klady a zápory metody a zamyšlení nad tvorbou analytického modelu.

Klíčová slova: abrazivní vodní paprsek, soustružení, ocel, drsnost, kruhovitost

Abstract

The diploma thesis focuses on the issue of turning using an abrasive water jet. It describes in more detail the influence of several process parameters on the amount of material removed. The possibility of turning other than cylindrical specimen shapes is also investigated. The experiments are designed, so that it is possible to best map the course of the machining process itself and determine its significant variables. New quantities are introduced in the work to facilitate the understanding of the process. The pros and cons of the method and reflections on the creation of an analytical model are evaluated.

Key words: abrasive waterjet, turning, steel, roughness, roundness

OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ A VELIČIN	VI
SEZNAM OBRÁZKŮ	XII
SEZNAM TABULEK	XV
1 ÚVOD	1
2 SOUHRN SOUČASNÉ TECHNOLOGIE AWJ	2
2.1 Model řezu abrazivním vodním paprskem	2
2.2 Model kvality povrchu po řezu AWJ	5
2.3 Souhrn významných parametrů procesu řezu AWJ	9
3 SOUHRN PARAMETRŮ AWJT	11
3.1 Princip a rozdělení AWJT	11
3.2 Významné měnitelné parametry soustružení a jejich vliv na proces AWJT	13
3.2.1 Vliv tlaku vody	13
3.2.2 Vliv průtoku abraziva	15
3.2.3 Vliv vzdálenosti ústí usměrňovací trubice od povrchu materiálu	16
3.2.4 Vliv frekvence otáčení vzorku a směru rotace materiálu	18
3.2.5 Vliv postupové rychlosti paprsku	21
3.2.6 Vliv hloubky záběru v materiálu, úhel dopadu paprsku na materiál	23
3.3 Parametry nevhodné k postupné změně v průběhu obrábění	25
3.3.1 Vliv velikosti abrazivních částic, druhu abraziva	25
3.3.2 Velikostní parametry trysky a usměrňovací trubice	26
4 MODEL Y SOUSTRUŽENÍ POMOCÍ AWJ	27
4.1 Finnieho model erozivního úběru	27
4.2 Modely tangenciálního módu soustružení	29
4.3 Modely radiálního módu soustružení	32
4.4 Hodnocení uvedených modelů, předpoklady k experimentální části	34
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39

5.1 Experimentální uspořádání	39
5.2 Vliv postupové rychlosti a frekvence otáčení na výsledný průměr	42
5.2.1 Měření na vzorku s kruhovým průřezem	42
5.2.2 Měření na vzorku se čtvercovým průřezem	46
5.3 Zkoumání objemu ubraného materiálu v závislosti na celkovém posuvu paprsku	49
5.4 Měření kvality povrchu vzorků s různými průřezy	56
6 ZÁVĚR	61
LITERATURA	64

SEZNAM SYMBOLŮ A VELIČIN

A	délka hrany vzorku se čtvercovým průřezem [m]
A_{1-6}	konstanty statistického modelu radiálního módu AWJT
AWJ	abrazivní vodní paprsek, řezání pomocí abrazivního vodního paprsku
AWJT	soustružení abrazivním vodním paprskem
a	původní střední velikost základní stavební jednotky materiálu – zrna [m]
a_m	průměrná velikost strukturní jednotky materiálu [m]
a_n	průměr abrazivních částic po směšovací procesu s vodou [m]
b	bezpečná vzdálenost usměrňovací trubice od povrchu materiálu [m]
c	koeficient modifikující ideální úběr materiálu jednou částicí [-]
C	boční odstup usměrňovací trubice od povrchu materiálu [m]
C_1	koeficient charakterizující kvalitu směšovacího procesu [-]
C_2	koeficient modifikující rychlost paprsku v souvislosti s množstvím abraziva [-]
C_3	koeficient modifikující ztráty rychlosti paprsku vlivem tření [-]
C_4	koeficient, jenž započítává vliv poměru průměru trysky k průměru usměrňovací trubice [-]
C_A	koeficient modifikující výkon abrazivního vodního paprsku ve vztahu ke změnám obsahu abraziva pod saturační úrovní [-]
C_Q	koeficient upravující postupovou rychlost pro danou kvalitu řezu [-]
C_R	koeficient zahrnující v sobě konstanty tvrdosti materiálu a abraziva, koeficient charakterizující tvar částic abraziva a jiné ve statistickém modelu drsnosti povrchu vzorku radiálního módu AWJT [-]
D	průměr jádra paprsku ve vzdálenosti L [m]
D_{bc}	výsledný průměr podstavy válce obrobeného AWJ bez kompenzací [m]
D_k	průměr vzorku na začátku k – té otočky [m]
d	hloubka záběru paprsku v materiálu [m]
d_0	průměr vodní trysky [m]

d_a	průměr usměrňovací trubice [m]
d_j	průměr paprsku [m]
d_r	hloubka průniku paprsku do materiálu v radiálním módu [m]
d_{rk}	změna průměru vzorku po k – té otočce [m]
d_v	vnější průměr usměrňovací trubice [m]
E	poměr hmotnosti ubraného materiálu k celkové hmotnosti dopadajících částic [-]
E_0	modul pružnosti v tahu [Pa]
E_{kD}	kinetická energie částice abraziva dopadající na povrch materiálu [J]
E_{kp}	kinetická energie částice abraziva po procesu rozrušování materiálu [J]
E_{km}	kinetická energie ubraných částic materiálu po procesu rozrušování [J]
E_r	energie spotřebovaná na rozrušení materiálu jednou dopadající abrazivní částicí [J]
e	koeficient charakterizující chování daného materiálu [-]
f	frekvence otáčení vzorku [min^{-1}]
GE	geometrická chyba – rozdíl mezi požadovaným průměrem vzorku materiálu a výsledným osoustruženým průměrem [m]
H	tloušťka materiálu [m]
H_a	tvrdost dopadajícího abraziva [-]
HV	tvrdost materiálu [-]
h	hloubka průniku abrazivního/čistého vodního paprsku do materiálu [m]
h_b	vzdálenost středové roviny materiálu od ústí usměrňovací trubice [m]
h_{lim}	limitní hloubka řezu pro AWJ řezání při dané postupové rychlosti [m]
h_n^*	sumární hloubka porušení materiálu (hloubka řezu) po n průchodech paprsku [m]
I	experimentálně určená konstanta pro statistický model radiálního AWJT [-]
$i1, i2, i3$	experimentálně určené konstanty pro statistický model radiálního AWJT [-]
K	poměr vertikální k horizontální síle působící na abrazivní částici [-]

L	vzdálenost středu ústí usměrňovací trubice od povrchu materiálu [m]
L_u	délka axiálního řezu paprsku ve směru osy rotace vzorku [m]
l_{1-5}	regresně určené koeficienty statistického modelu drsnosti povrchu materiálu po soustružení AWJT v radiálním módu [-]
M	celková hmotnost dopadajících částic abraziva [kg]
MRR	rychlost úběru materiálu [cm ³ /min]
m	průměrná hmotnost dopadající částice abraziva [kg]
m_m	hmotnost ubraného materiálu částicí abraziva [kg]
N	počet otáček jednotlivých částí materiálu během průchodu paprsku [-]
N_k	počet částic abraziva dopadajících v určité k-té části paprsku, definované dopadovým úhlem [-]
O	tvarová odchylka [mm]
P	taper – velikost zkosení boční stěny materiálu po řezu AWJ [m]
PEEK	semi – krystalický plast Polyetereterketon
P_p	počet bočních posuvů do materiálu [-]
p_0	tlak kapaliny před tryskou [Pa]
p_j	tlak získaný z Bernoulliho rovnice při dané hustotě a rychlosti AWJ [Pa]
Q	objem ubraného materiálu jednou dopadající částicí abraziva [m ³]
Q_c	celkový objem ubraného materiálu připadající na axiální posuv paprsku o délce průměru paprsku [m ³]
Q_n	objem ubraného materiálu na jednu n-tou otočku [m ³]
Q_{nk}	objem ubraného materiálu připadající na k-tou část materiálu a n-tou otočku materiálu [m ³]
q	lineární posuv úhlu [°]
q_a	hmotnostní průtok abraziva [kg/s]
q_w	hmotnostní průtok vody [kg/s]
R	poloměr soustruženého vzorku [m]

R_i	původní průměr vzorku na počátku i-té otočky [m]
R_p	počáteční průměr vzorku [m]
R_f	finální průměr vzorku po dokončení řezu v dané hloubce záběru [m]
R_k	konečný průměr vzorku po provedení experimentu [m]
S_e	efektivní plocha [m ²]
S_M	plocha, na které vytváří paprsek porušení překonáváním pevnosti materiálu [m ²]
S_p	poměr mezi množstvím zrn neobsahujícím defekty a celkovým množstvím abrazivních zrn [-]
T	hodnota napětí, po jejímž dosažení nastává plastický tok materiálu [Pa]
t_i	interakční čas [s]
V	objem kapaliny vstupující do interakčního prostoru [m ³]
\tilde{V}	objem kapaliny vystupující z interakčního procesu [m ³]
V_M	objem materiálu interagujícího s kapalinou [m ³]
v	rychlost výtoku paprsku z trysky [m.s ⁻¹]
v_a	rychlost směsi abraziva a kapaliny po procesu směšování [m.s ⁻¹]
v_d	dopadová rychlost částic abraziva na povrch materiálu [m.s ⁻¹]
v_i	rychlost po interakci kapky kapaliny se zrnem abraziva [m.s ⁻¹]
v_L	rychlost ve vzdálenosti L od výstupního ústí trysky [m.s ⁻¹]
\tilde{v}_L	rychlost paprsku po interakci ve vzdálenosti L od výstupu z trysky [m.s ⁻¹]
v_M	rychlost částic materiálu po interakci paprsku [m.s ⁻¹]
v_o	obvodová rychlost povrchu otáčejícího se materiálu [m.s ⁻¹]
v_r	relativní rychlost dopadu částice na materiál, uvažovaná jako součet dopadové rychlosti částice a obvodové rychlosti ve směru rovnoběžném k dopadové rychlosti [m.s ⁻¹]
v_p	postupová rychlost paprsku [m.s ⁻¹]
$v_{p\lim}$	limitní postupová rychlost postačující k prořezání materiálu dané tloušťky [m.s ⁻¹]

$v_{p\min}$	korekce rychlosti při zastavení hlavičky ($a_n/60$) [m.s^{-1}]
v_{PQ}	postupová rychlost pro danou kvalitu řezu [m.s^{-1}]
x	rozdíl poloměru vzorku a hloubky záběru do materiálu [m]
y_b	souřadnice bodu s daným bočním odstupem usměrňovací trubice od materiálu [m]
y_v	souřadnice bodu s daným výškovým odstupem usměrňovací trubice od materiálu [m]
Δy	hloubka průniku paprsku při soustružení na kraji soustruženého vzorku [m]
Z	trailback, zpoždění paprsku při prořezu materiálu [m]
z_b	souřadnice bodu s daným bočním odstupem usměrňovací trubice od materiálu [m]
z_v	souřadnice bodu s daným výškovým odstupem usměrňovací trubice od materiálu [m]
α	dopadový úhel paprsku na materiál (úhel mezi tečnou k povrchu materiálu, a rovinou danou směrem postupové rychlosti paprsku a směrem dopadu paprsku na materiál) [°]
α_e	experimentálně určený koeficient ztráty rychlosti abrazivního vodního paprsku při interakci s materiálem [-]
α_k	dopadový úhel na začátku k – té otočky [°]
α_n	součinitel ztráty rychlosti paprsku při interakci s materiálem po n průchodech [-]
γ	stlačitelnost kapaliny při tlaku p_0 [-]
γ_p	zkrácení vztahu definujícího změnu hustoty při stlačení [-]
δ	úhel mezi tečnou k povrchu materiálu a postupujícím paprskem [°]
ε	předpovězená chyba statistického modelu pro geometrickou chybu [m]
η	dynamická viskozita kapaliny [N.s.m^2]
θ	deklinací úhel trajektorie paprsku v materiálu [°]
θ_{\lim}	výstupní deklinací úhel [°]
μ	ztrátový součinitel trysky [-]
ξ	součinitel útlumu paprsku v prostředí mezi ústím trysky a materiálem [m^{-1}]
ξ_j	útlumový koeficient abrazivního kapalinového paprsku v prostředí mezi výstupem z usměrňovací trubice a povrchem materiálu [m^{-1}]

ξ^*	součinitel útlumu paprsku v již vytvořené drážce [m^{-1}]
ρ_0	hustota kapaliny za normálních podmínek [kg.m^{-3}]
ρ_a	hustota abrazivních částic [kg.m^{-3}]
ρ_j	hustota abrazivního paprsku (homogenní tekutina) [kg.m^{-3}]
ρ_m	objemová hmotnost obráběného materiálu [kg.m^{-3}]
ρ_M^*	měrná hmotnost materiálu stanovená pomocí pyknometru [kg.m^{-3}]
ρ_v	hustota vody [kg.m^{-3}]
σ	pevnost obráběného materiálu [Pa]
σ_M	mechanické napětí způsobené odporem materiálu vůči proudu kapaliny [Pa]
σ_m	pevnost obráběného materiálu v tahu/tlaku [Pa]
σ_s	pevnost materiálu ve smyku [Pa]
φ	inklinační úhel [$^\circ$]
φ_{lim}	limitní inklinační úhel [$^\circ$]
χ	součinitel rozšíření odraženého paprsku při jeho smísení s rozrušeným materiálem [-]
ψ	poměr hloubky kontaktu částice s materiálem k hloubce průniku částice do materiálu [-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.	Schéma řezné hlavice abrazivního vodního paprsku	2
Obr. 2.	Rychlostní profil paprsku během šíření médiem [10]	3
Obr. 3.	Striace na povrchu 50 mm tlustého hliníku řezaného pomocí AWJ [14]	5
Obr. 4.	Znázornění definovaného deklinačního úhlu paprsku [10]	6
Obr. 5.	Znázornění nedořezu trailback [16]	7
Obr. 6.	Vykreslení zkosení stěn materiálu (taper) [11]	8
Obr. 7.	Zkreslení válcově řezaného vzorku [13]	8
Obr. 8.	Tvar válečku po kompenzaci jevu trailback [13]	9
Obr. 9.	Schéma soustružení abrazivním vodním paprskem	11
Obr. 10.	Radiální mód s některými parametry	12
Obr. 11.	Tangenciální mód s některými parametry	12
Obr. 12.	Změny vlnitosti vzorku karbidu bóru při změnách tlaku [4]	14
Obr. 13.	Predikce výsledné hloubky řezu v závislosti na použitém tlaku [19]	14
Obr. 14.	Pozorovaná limitní dosažená hodnota úběru materiálu pro dané tlaky a průtoky abraziva	15
Obr. 15.	Vizualizace výšky usměrňovací trubice nad materiálem	16
Obr. 16.	Zobrazení vzdáleností od povrchu materiálu v obou směrech ($L = 3 \text{ mm}$, $C = 3 \text{ mm}$ a $R = 20 \text{ mm}$)	17
Obr. 17.	Srovnání různých frekvencí otáčení materiálu a směru rotace [23]	19
Obr. 18.	Vliv směru rotace a frekvence otáčení při soustružení pískovce [24]	20
Obr. 19.	Podřezy vznikající během radiálního soustružení [21]	21
Obr. 20.	Vliv postupové rychlosti na výsledný průměr vzorku [26]	22
Obr. 21.	Vliv postupové rychlosti na dopadový úhel paprsku [21]	22
Obr. 22.	Vliv postupové rychlosti na úběr kompozitu PEEK vyztuženého vlákny a kvalitu povrchu [20]	23
Obr. 23.	Modelované a reálné hodnoty průměru slitiny hliníku [28]	24
Obr. 24.	Mikroskopický obrázek granátu (vlevo) a olivínu [29]	25
Obr. 25.	Porovnání odezvy ubraného množství kujného a křehkého materiálu [32]	28
Obr. 26.	Obdobná závislost úběru kujných materiálů na dopadovém úhlu [33]	29

Obr. 27. Predikované a naměřené hodnoty geometrické chyby [34]	32
Obr. 28. Trajektorie paprsku při radiálním soustružení a zavedené veličiny [21]	33
Obr. 29. Znázornění dopadu AWJ na materiál	35
Obr. 30. Znázornění úběru materiálu z jeho kraje	36
Obr. 31. Vliv dopadového úhlu paprsku na tvar ubíraného objemu materiálu (se zvětšeným měřítkem)	37
Obr. 32. Laboratoř s abrazivním vodním paprskem a experimentální aparaturou	39
Obr. 33. Zařízení pro rotaci materiálu s popisky	40
Obr. 34. CNC program pro soustružení a zároveň pohled shora na trajektorii paprsku	41
Obr. 35. Nastavení měření kruhovitosti vzorku	42
Obr. 36. Různé části posuvného měřidla použité při měření	43
Obr. 37. Změna průměru vzorku v závislosti na postupové rychlosti a frekvenci otáčení	45
Obr. 38. Porovnání kvality povrchu vzorků s kruhovým průřezem a různými parametry	46
Obr. 39. Znázornění nastavení soustružení vzorku se čtvercovým průřezem	46
Obr. 40. Změna průměru vzorku v závislosti na postupové rychlosti a frekvenci otáčení pro čtvercový průřez	47
Obr. 41. Zkreslení výsledného povrchu při použití vzorku se čtvercovým průřezem	48
Obr. 42. Reálná hloubka záběru v závislosti na strojovém posuvu do materiálu kruhového vzorku	51
Obr. 43. Množství ubraného objemu materiálu v závislosti na bočním posuvu stroje	51
Obr. 44. Ubraný objem materiálu v závislosti na úhlu dopadu paprsku (hloubka záběru 0,5 mm)	52
Obr. 45. Ubraný objem materiálu v závislosti na úhlu dopadu paprsku (hloubka záběru 0,75 mm)	52
Obr. 46. Ubraný objem materiálu v závislosti na úhlu dopadu paprsku (hloubka záběru 1 mm)	53
Obr. 47. Závislost efektivní plochy na středním dopadovém úhlu paprsku (hloubka záběru 0,5 mm)	54
Obr. 48. Závislost efektivní plochy na středním dopadovém úhlu paprsku (hloubka záběru 0,75 mm)	54
Obr. 49. Závislost efektivní plochy na středním dopadovém úhlu paprsku (hloubka záběru 1 mm)	55
Obr. 50. Nedořezy na vzorku čtvercového průřezu s hloubkou záběru 0,5 mm	56
Obr. 51. Nedořezy na vzorku čtvercového průřezu s hloubkou záběru 0,75 mm (A) a 1 mm (B)	57

Obr. 52. Soustružený vzorek se šestiúhelníkovým průřezem	58
Obr. 53. Přibližný výsledný eliptický tvar soustružených vzorku	59
Obr. 54. Povrch materiálu při postupové rychlosti 10 mm/min (A) a 50 mm/min (B)	60
Obr. 55. Povrch materiálu při celkovém bočním posuvu paprsku 1 mm (A) a 5 mm (B)	60

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Parametry zařízení AWJ pracoviště kapalinového paprsku	39
Tabulka 2	Vlastnosti oceli ČSN 11 375	40
Tabulka 3	Vlastnosti oceli ČSN 11 109	40
Tabulka 4	Parametry experimentu s proměnnou rychlostí a frekvencí otáčení	42
Tabulka 5	Počet průchodů v souvislosti s proměnnými veličinami	44
Tabulka 6	Finální průměry vzorku v mm (1 experiment)	44
Tabulka 7	Objem ubraného materiálu v mm ³ připadající na délku posuvu rovnou průměru paprsku	44
Tabulka 8	Finální průměry vzorku (2 experiment)	47
Tabulka 9	Parametry experimentu s navyšujícím se celkovým posuvem paprsku do materiálu (kruhový průřez)	49
Tabulka 10	Počet bočních posuvů paprsku do materiálu	49
Tabulka 11	Průměr vzorku a vyvozené parametry pro hloubku záběru 0,5 mm	50
Tabulka 12	Průměr vzorku a vyvozené parametry pro hloubku záběru 0,75 mm a 1 mm	50
Tabulka 13	Parametry experimentu s navyšujícím se celkovým posuvem paprsku do materiálu (čtvercový průřez)	56
Tabulka 14	Počet bočních posuvů paprsku do materiálu pro různé hloubky záběru (čtvercový průřez)	56
Tabulka 15	Změna průměru vzorku v souvislosti s pozicí měření	57
Tabulka 16	Změna drsnosti a kruhovitosti povrchu v závislosti na postupové rychlosti a frekvenci otáčení	58
Tabulka 17	Změna drsnosti a kruhovitosti vzorku v závislosti na hloubce záběru a celkovém bočním posuvu paprsku do materiálu	58
Tabulka 18	Drsnost a odchylky kruhovitosti vzorku se čtvercovým průřezem	59
Tabulka 19	Odchylky kruhovitosti vzorku se šestiúhelníkovým průřezem	59

1 ÚVOD

Abrazivní vodní paprsek (AWJ) je technologie, která se začala vyvíjet již na konci sedmdesátých a na počátku osmdesátých let. Řezání pomocí AWJ od této doby prošlo významným vývojem. Využívá vody pod vysokým tlakem, jež je vypouštěna přes úzkou trysku. Následně dochází ke směšování vody s abrazivem, při kterém voda předává část své energie zrnům abraziva. Tato směs dokáže erozně obrábět téměř jakýkoli materiál. V současné době je AWJ používán jak ke klasickým 2D řezům dle výkresové dokumentace, tak i ke 3D řezům. Kromě uvedeného byly vyvinuty metody pro řezání paprskem s velmi velkou přesností, která dosahuje hodnot 10 μm [1]. Jak čistý vodní paprsek, tak i abrazivní vodní paprsek našly mnohé využití v dnešních průmyslových aplikacích. Hlavní přednosti této progresivní metody porušování materiálu oproti konvenčním technologiím i některým speciálním technologiím (plasma, laser) jsou [2]:

- Schopnost rozrušovat téměř jakýkoliv typ materiálu bez ohledu na jeho mechanické vlastnosti
- Zanedbatelné tepelné ovlivnění řezaného materiálu
- Nízké síly působící na materiál (méně než 40 N)
- Neopotrebení řezného nástroje
- Jednoduchá flexibilní změna charakteristiky AWJ (vzdálenost ústí trysky od povrchu materiálu, tlak vody na vstupu, úhel náklonu paprsku)

Současné s hlavní aplikací AWJ byly testovány další možnosti náhrady konvenčních technologií tímto flexibilním nástrojem. Jedná se o frézování a soustružení (AWJT) pomocí AWJ [3], [4]. Široké uplatnění těchto technologií v průmyslu se ovšem nejeví být významné. Obě metody narážejí na svoje limity buďto nedostatečným teoretickým modelem, nebo ekonomickou efektivitou použití. Kvůli tomu je AWJ využit pouze při specifických aplikacích a obrábění materiálů, kde je tento způsob ekonomicky výhodný a existují dostatečné modely (ať už analytické nebo statistické), popř. kontrolní mechanismy zajišťující dostatečnou přesnost výsledného tvaru.

Kromě uvedeného existují i speciální aplikace kapalinových paprsků určené nejen pro obrábění materiálu. V lékařství se jedná o odebírání mrtvé tkáně (versajet), který využívá Venturiho jevu [5]. Oproti mechanickému chirurgickému odstranění nekrotické tkáně nedochází k poškození zdravé tkáně, takže doba léčení po této proceduře je nižší. Pulzní vodní paprsek se využívá k čištění starých nátěrů, vrstev a plášťů v automobilovém průmyslu, u lodí nebo vnitřních stěn nádoby reaktoru [6].

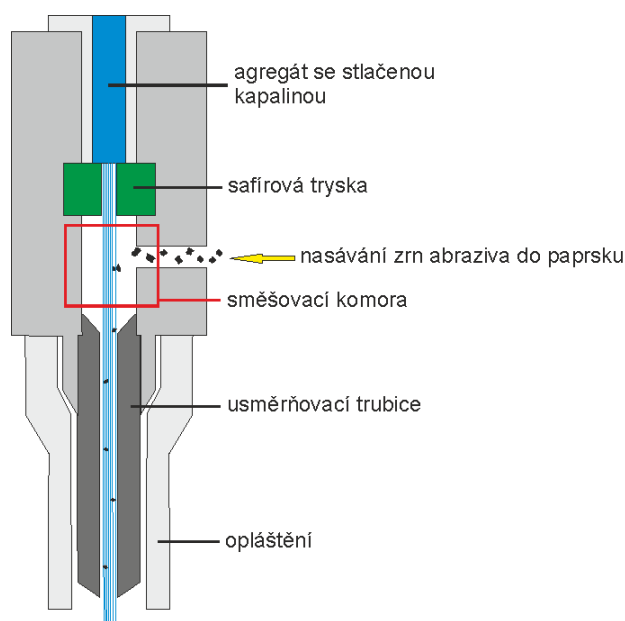
Takzvaný waterjet peening je metoda vytvrzování povrchu materiálu pomocí kapalinového paprsku. Při vysoké frekvenci dopadů kapek na povrch kovových komponentů dochází k lokálním plastickým deformacím, jejichž důsledkem je vznik zbytkového napětí ve vrstvách materiálu poblíž jeho povrchu. Dochází tím ke zvýšení tvrdosti povrchu materiálu a jeho odolnosti vůči únavě materiálu [7].

Experimentální určení významných proměnných všech těchto procesů, formulace těchto poznatků do ideálně čistě analytických modelů (pro specifické aplikace většinou postačují i statistické modely, které ovšem nejsou použitelné globálně) se zdá být klíčové k rozšíření AWJ do dalších oborů lidské činnosti. Tato práce je zaměřena na ohodnocení vlivu parametrů abrazivního vodního paprsku pro soustružení.

2 SOUHRN SOUČASNÉ TECHNOLOGIE AWJ

2.1 Model řezu abrazivním vodním paprskem

Princip obrábění AWJ využívá vody natlakované čerpadlem na vysoké tlaky (běžná hodnota tlaku okolo 350MPa), která je vedena do řezné hlavice (obr. 1). Zde dochází k vypouštění natlakované vody skrze úzkou trysku, díky čemuž voda dosahuje vysokých rychlostí. Do řezné hlavice je zabudován přívod abrasiva, který proudící voda samovolně nasává do toku (Venturiho efekt) ve směšovací komoře. Přes usměrňovací trubici je směs abrasiva a vody fokusována na obráběný materiál, kde dochází k jeho erozivnímu úběru.



Obr. 1. Schéma řezné hlavice abrazivního vodního paprsku

Řezání abrazivním vodním paprskem se v současné době zdá být dostatečně probádaným procesem, o čemž svědčí rozšíření této nekonvenční technologie obrábění napříč průmyslem. Za tímto vývojem stojí především kvalitní analytické modely fyzikálních makro procesů souvisejících s tvorbou paprsku, jeho následným šířením v daném prostředí a interakcí směsi vody a abrasiva s materiálem. Jedním z používaných modelů je model vytvořený Hlaváčem [8]. Jeho model porušování materiálu pomocí AWJ stojí ze základu na modelu působení čistého vodního paprsku, který je pro zobecnění na paprsek s abrazivem upraven pomocí pozměněných koeficientů a nových korekčních koeficientů. Druhá alternativa uvedená Hlaváčem je zavedení průměrného objemu ubraného materiálu na jedno zrno abrasiva pro daný materiál a typ abrasiva.

Z hlediska formování paprsku je první důležitou rovnicí zákon zachování energie, který určuje rychlost toku vody po průchodu vysokotlaké vody úzkou tryskou, v podobě upravené Bernoulliho rovnice [8]:

$$\frac{1}{2} \rho_0 v^2 = \mu p_0 (1 - \eta p_0) \quad (2.1)$$

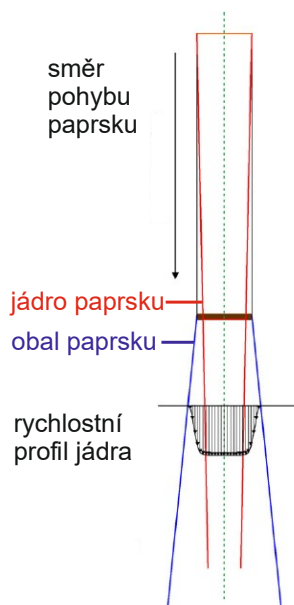
$$v = \sqrt{\frac{2\mu p_0(1-p_0)}{\rho_0}} \quad (2.2)$$

Následně dochází ke směšování abraziva s urychlenou vodou, kde je nejprve nutno zohlednit rozdrčení zrn abraziva díky nárazu vody. Poté je vyjádřena rychlost směsi pomocí zákona zachování hybnosti pro nepružnou srážku kapky vody a abraziva [9]:

$$v_a = C_1 C_2 C_3 C_4 v \frac{q_w}{q_w + q_a} \quad (2.3)$$

Kde parametr C_1 charakterizuje kvalitu směšovacího procesu a modifikuje rychlost AWJ v případě, že množství abraziva dodávaného do procesu přesáhne limit pro dokonalé směšování. C_2 snižuje rychlost paprsku v případě, že počet částic přesáhne hodnotu, kdy se dá považovat proudění ve směšovací trubici za ideální. Koeficient C_3 započítává ztráty rychlosti vlivem tření částic abraziva o stěny usměrňovací trubice a koeficient C_4 započítává vliv poměru velikost trysky a usměrňovací trubice na rychlost abrazivního kapalinového paprsku [9]. Tyto koeficienty jsou závislé na původní velikosti abraziva, průtoku abraziva a na velikostech trysky a trubice. Paprsek je dále brán jako spojitě prostředí směsi vody a abraziva, a jeho energii lze vyjádřit jako kinetickou energii této směsi.

Při průchodu čistého kapalinového paprsku okolním prostředím se z energetického hlediska zavádí pojem jádra paprsku. Do něj patří veškerá kapalina, jejíž rychlost je maximálně o 95% nižší, než rychlost vody v ose paprsku (maximální rychlost). Toto jádro s narůstající vzdáleností od ústí trysky více konverguje, až zcela vymizí [8]. Uvnitř trysky zahrnuje většinu energie paprsku a vlivem odporu prostředí dochází k energetickým ztrátám (obr. 2). Experimentálně byl určen poloměr jádra paprsku v ústí trysky i při šíření prostředím. Model předpokládá konstantní maximální rychlost kapaliny v jádru, přičemž mimo něj byla vytvořena rovnice rychlostního profilu paprsku.



Obr. 2. Rychlostní profil paprsku během šíření médiem [10]

Jako základ modelu řezání materiálu vodním paprskem je využit zákon zachování energie v následující podobě:

$$\frac{1}{2}\rho_0 V_L^2 = \frac{1}{2}\rho_0 \tilde{V}_L^2 + \frac{1}{2}\rho_m V_M v_M^2 + \sigma_M S_M h \quad (2.4)$$

Pravá strana rovnice představuje kinetickou energii dopadajícího čistého vodního paprsku. První člen levé strany má význam kinetické energie zbytkové vody z procesu, druhý člen kinetické energie obrobených částic materiálu a poslední člen vyjadřuje energii potřebnou k rozrušení materiálu do hloubky h . Člen σ_M představuje mechanické napětí způsobené odporovou silou proti pronikání paprsku a S_M je velikost interakční plochy. Z rovnice je vyjádřena hloubka porušení h , přičemž jsou pomocí doplňujících vztahů, jako zákona zachování hybnosti soustavy kapka vody a zrno obráběného materiálu, vyjádřeny zbylé neznámé proměnné [8]:

$$h = \frac{\pi d_0 \sqrt{2\rho_0 \mu^3 \gamma_p^3 p_0^3 e^{-5(\xi L + \xi^* h_n^*)}} (1 - \alpha_n^2) \cos \beta}{4\chi \rho_m \tilde{V}_p^{\frac{\rho_0}{\rho_m}} \left(\alpha_n^2 e^{-2(\xi L + \xi^* h_n^*)} \mu \gamma_p p_0 + \frac{\rho_0}{\rho_m} \sigma \right)} \quad (2.5)$$

Parametr α_n , který mimo jiné popisuje, zda dochází k porušování materiálu ($\alpha > 0$) nebo nikoliv ($\alpha \leq 0$) je vyjádřen následovně:

$$\alpha_n = 1 - \frac{C_f^2 \sqrt{2\mu^3 \gamma_p^3 p_0^3 \rho_M^* k^*}}{8\sqrt{\rho_0} \eta \sigma_s a e^{3(\xi L + \xi^* h_n^*)}} \quad (2.6)$$

A výsledná hloubka řezu jako součet několika iterací průchodu paprsku materiálem:

$$h_n^* = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_{n-1} + h_n \quad (2.7)$$

Při přechodu modelu na abrazivní vodní paprsek dochází tedy k zavedení korekčních faktorů. Jedná se postupně o rovnici změny rychlosti (2.3), hustoty směsi kapaliny s abrazivem (2.8), změny impaktních tlaků této směsi (2.9) a rovnici popisující zvyšování výkonu AWJ související se zvyšováním hmotnostního průtoku abraziva (2.10 až 2.12) [11]:

$$\rho_j = \frac{4\rho_a(q_w + q_a)}{\pi\rho_a v_i d_0^2 + 4q_a} \quad (2.8)$$

$$p_j = \frac{1}{2} \rho_j v_a^2 \quad (2.9)$$

$$C_A = \frac{4q_a}{\pi\rho_a v_a d_a^2}, \text{ přičemž pro } \frac{4q_a}{\pi\rho_a v_a d_a^2} \geq 1 \text{ platí } C_A = 1 \quad (2.10, 2.11, 2.12)$$

Do vztahu 1.5 jsou tyto změny zavedeny a kromě toho je započítána i postupová rychlost abrazivního vodního paprsku po povrchu obráběného materiálu. To umožňuje vyjádřit limitní hloubku prořezu daného materiálu, jež je rovna [12]:

$$h_{\lim} = \frac{C_A S_p \pi d_0 \sqrt{2 \rho_j p_j^3 e^{-5\xi_j L}} (1 - \alpha_e^2)}{8(v_p + v_{p\min})^{1.5} (p_j \rho_m \alpha_e^2 e^{-2\xi_j L} + \sigma_m \rho_j)} \quad (2.13)$$

Koeficient α_e je dán vztahem:

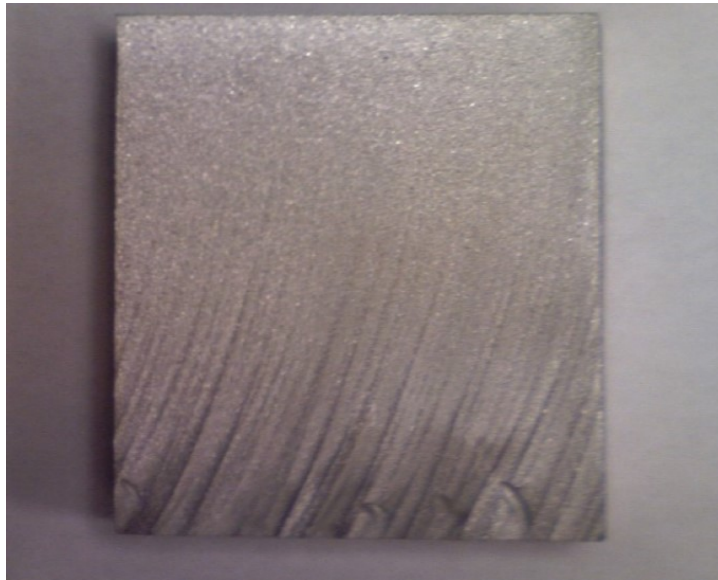
$$\alpha_e = 1 - \frac{\sqrt{2 p_j^3 H V t_i}}{8 \sqrt{\rho_j \sigma_m a_m}} \quad (2.14)$$

Úpravou je možné vyjádřit postupovou rychlost nutnou k prořezání materiálu dané tloušťky jako [13]:

$$v_p = \left[\frac{C_A S_p \pi d_0 \sqrt{2 \rho_j p_j^3 e^{-5\xi_j L}} (1 - \alpha_e^2)}{8 H (p_j \rho_m \alpha_e^2 e^{-2\xi_j L} + \sigma \rho_j)} \right]^{2/3} - v_{p\min} \quad (2.15)$$

2.2 Model kvality povrchu po řezu AWJ

Povrch stěny řezu vytvořeného při takto definované postupové rychlosti (1.15) je velmi vlnitý a nekvalitní, především v hloubkách řezu blížících se tloušťce materiálu. Dalším cílem uvedeného modelu proto bylo definovat vhodné parametry k ohodnocení kvality povrchu stěn materiálu a zakomponovat je do uvedeného modelu. Byla provedena vizualizace erozního úběru materiálu a tvorby stopy, zvlnění a striací (viditelné zvlnění kopírující trajektorii paprsku v materiálu, jež vzniklo fluktuací tlaku v čerpadle a následným nehomogenním rozložením rychlostí v toku paprsku) na stěnách materiálu (obr. 3). Studie ukazuje zpoždování paprsku a jeho zakřivování při postupu materiálem (obr. 4) [10].



Obr. 3. Striace na povrchu 50 mm tlustého hliníku řezaného pomocí AWJ [14]

Povrch obrobeneho materiálu při limitní postupové rychlosti byl ohodnocen do pěti zón kvality podle drsnosti, přičemž nejkvalitnější zóna je ta nejbliže povrchu (drsnost do 6,3 μm , do 15% maximální hloubky) a nejhorší pátá při výstupu paprsku z materiálu (drsnost nad 400 μm). Byla

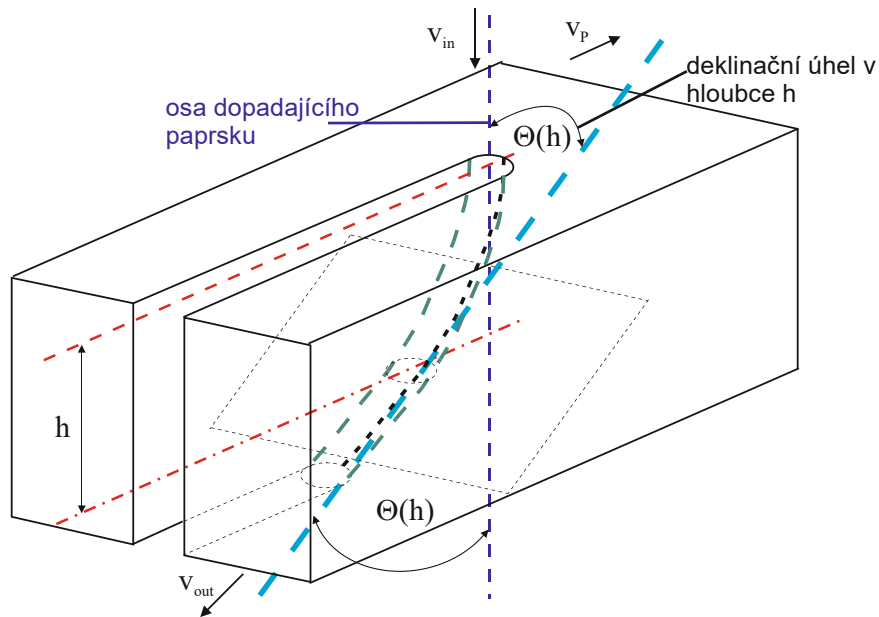
zavedena experimentální limitní postupová rychlost, která musí splňovat podmínku, že nesmí docházet k nedořezům častěji než jeden na 5 centimetrů a délka tohoto nedořezu, nesmí být vyšší než 25% šířky řezu.

Podle pěti zón kvality řezu byly stanoveny hodnoty koeficientu kvality (C_Q) výsledného povrchu, které snižují limitní postupovou rychlost tak, aby bylo dosaženo požadovaného povrchu [15]. Tato modifikace může být vyjádřena následovně:

$$v_{PQ} = C_Q \left[\frac{C_A S_p \pi d_0 \sqrt{2 \rho_j p_j^3 e^{-5 \xi_j L}} (1 - \alpha_e^2)}{8 H (p_j \rho_m \alpha_e^2 e^{-2 \xi_j L} + \sigma \rho_j)} \right]^{\frac{2}{3}} - C_Q v_{p \min} \quad (2.16)$$

Hodnoty koeficientu C_Q nabývají hodnot od nejkvalitnějšího povrchu po nejhorší 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 a 0,9.

Užitečným zjištěním bylo, že zakřivení dráhy paprsku je pro homogenní nebo kvazi – homogenní materiál obdobné. Byl zaveden tzv. deklinační úhel, který je definován jako úhel směru trajektorie paprsku a směru dopadajícího paprsku v dané hloubce řezu $\Theta(h)$.



Obr. 4. Znázornění definovaného deklinačního úhlu paprsku [10]

Bylo pozorováno, že deklinační úhel v limitní hloubce porušení vzorku (výstupní deklinační úhel) je stejný pro různé druhy materiálu [15]. Uvedené poznatky umožňují vyjádřit deklinační úhel následovně:

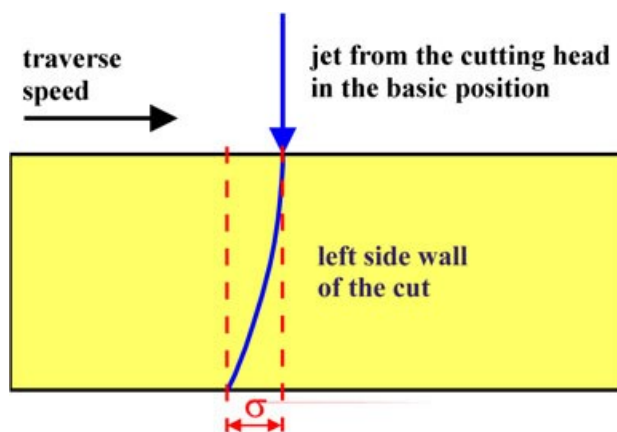
$$\theta = \theta_{\lim} \left(\frac{h}{h_{\lim}} \right)^{1.5} \quad (2.17)$$

nebo i pomocí postupové rychlosti:

$$\theta = \theta_{\lim} \left(\frac{v_P}{v_{P\lim}} \right)^{1.5} \quad (2.18)$$

$$v_P = v_{P\lim} \left(\frac{\theta}{\theta_{\lim}} \right)^{2/3} \quad (2.19)$$

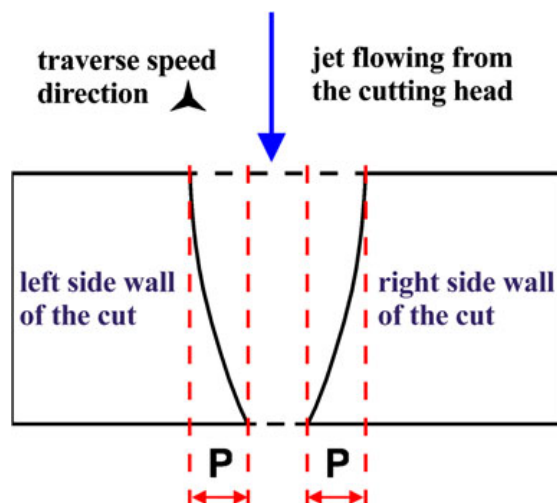
Tyto vztahy mají velký význam. Pomocí experimentálních řezů, známého konstantního deklinačního úhlu v limitní hloubce θ_{\lim} , naměřeného úhlu θ a postupové rychlosti v_P nebo hloubce řezu h lze určit limitní hloubku řezu nebo limitní postupovou rychlost pro určitý materiál za daných parametrů AWJ [15]. Mimo to se dá deklinační úhel také použít k definici zón kvality a určuje i velikost nedořezů na koncích lineárních řezů (trailback). Tyto nedořezy vznikají, jelikož postup paprsku na výstupu z materiálu je opožděn oproti postupu na povrchu materiálu (mimo jiné především v závislosti na postupové rychlosti paprsku). Parametr trailback (Z) je definován dle obrázku 5 a vyjádřen pomocí rovnice 2.20 [16].



Obr. 5. Znázornění nedořezu trailback [16]

$$Z = \frac{2}{5} H \cdot \operatorname{tg} \left[\left(\theta_{\lim} \frac{v_P}{v_{P\lim}} \right)^{1.5} \right] \quad (2.20)$$

Kromě uvedeného dochází obecně ke zkosení stěn materiálu (taper P) ve směru kolmém na průchod paprsku (obr. 6).



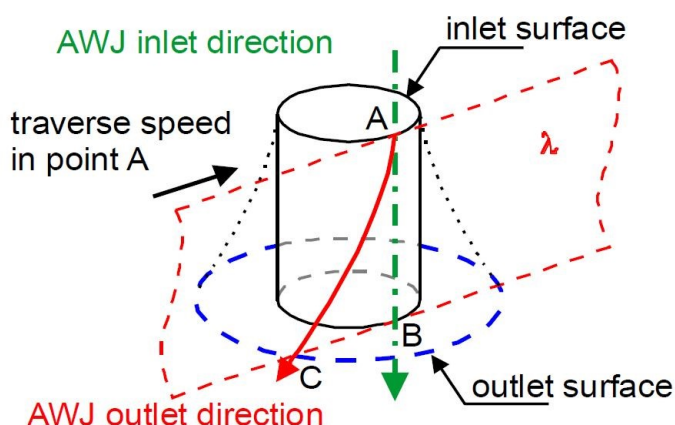
Obr. 6. Vykreslení zkosení stěn materiálu (taper) [11]

Obdobně jako deklinační úhel a trailback lze vyjádřit tzv. inklinací úhel (rov. 2.21 a 2.22) [11].

$$\varphi = \varphi_{\lim} \left(\frac{h}{h_{\lim}} \right)^{\frac{2}{5}} + q \quad (2.21)$$

$$P = \frac{2}{5} H \cdot \tan \varphi \quad (2.22)$$

Při řezu zakřivených ploch abrazivním vodním paprskem dochází jednak ke zpoždění paprsku (trailback), tak i ke zkosení stěn (taper), přičemž oba tyto jevy způsobují dohromady zkreslení rozměru řezaného dílu. Příkladem může být řezaný válec, kde jedna ze základů dosahuje průměru určeného dráhou stopy paprsku na vstupním povrchu materiálu, přičemž druhá je obrobena na vyšší průměr (obr. 7). Bod A na obrázku představuje vstupní bod paprsku do materiálu a bod C výstupní bod trajektorie paprsku z materiálu.

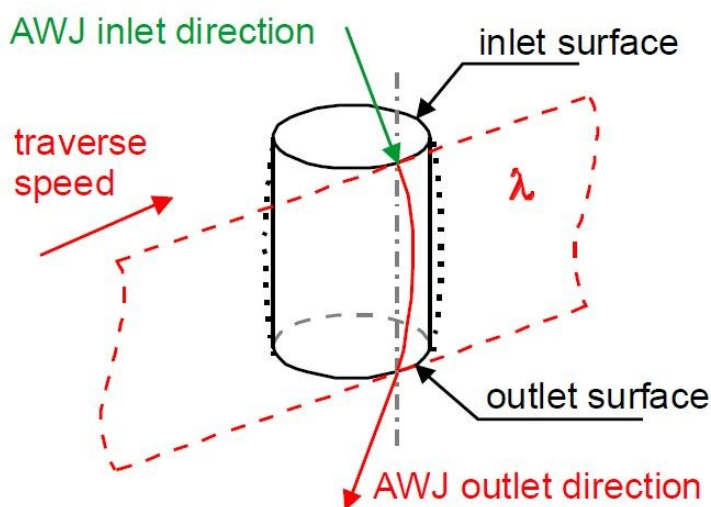


Obr. 7. Zkreslení válcově řezaného vzorku [13]

Průměr spodní zvětšené podstavy se dá vyjádřit geometrickým vztahem [13]:

$$D_{bc} = 2 \left[\sqrt{\left(\frac{2}{5} H \tan \theta \right)^2 + R^2} + \frac{2}{5} H \tan \varphi \right] + d_a \quad (2.23)$$

Trailback lze částečně kompenzovat buď nižší postupovou rychlostí paprsku, nebo náklonem řezné hlavice o polovinu výstupního deklinačního úhlu ve směru trajektorie paprsku. Zkosení stěn je možno řešit náklonem paprsku ve směru kolmém na trajektorii paprsku. Tvar válečku při kompenzaci jevu trailback je načrtnut na obrázku 8.



Obr. 8. Tvar válečku po kompenzaci jevu trailback [13]

2.3 Souhrn významných parametrů procesu řezu AWJ

Jak je patrné z předchozího modelu, proces obrábění abrazivním kapalinovým paprskem je spojen s velkým množstvím veličin a parametrů. Některé z těchto parametrů umožňují změnu i během obrábění a jsou tedy vhodné k řízení vlastností AWJ. Zbytek parametrů je nutno nastavit předem a změna v průběhu je nemožná nebo nepraktická.

Mezi jednoduše měnitelné parametry procesu patří:

- Tlak vody – Jde o zásadní výkonnostní parametr, který je většinou neměnný na své operativní hodnotě.
- Průtok abraziva – Maximální hodnota je omezena ostatními parametry tak, aby nedošlo ke snížení efektivity řezu.
- Vzdálenost ústí usměrňovací trubice od povrchu materiálu – Udrží se většinou konstantní a co nejblíže k povrchu.
- Postupová rychlost – Z praktického hlediska se jedná o pravděpodobně nejpoužívanější proměnnou při obrábění. Má vliv na výkon paprsku a kvalitu obrobeneho povrchu.

- Úhel dopadu paprsku – parametr umožňující zvýšení výkonu paprsku a významný parametr definující kvalitu výsledného povrchu

Mezi neměnitelné parametry se řadí:

- Průměr vodní trysky - nutno dodržet určité vztahy mezi průměrem usměrňovací trubice a střední velikostí částic abraziva
- Typ abraziva
- Střední velikost abrazivních částic – Velikost je definována výrobcem abraziva, přičemž je vyráběno jen v určitých rozměrových řadách. Vzhledem k ostatním proměnným musí být dodrženy určité korelační vztahy.
- Kvalita abrazivních částic – parametr důležitý ve směšovacím procesu
- Průměr usměrňovací trubice – parametr určující velikost stopy paprsku na povrchu materiálu
- Délka usměrňovací trubice
- Tloušťka materiálu
- Vlastnosti obráběného materiálu – tvrdost, pevnost...

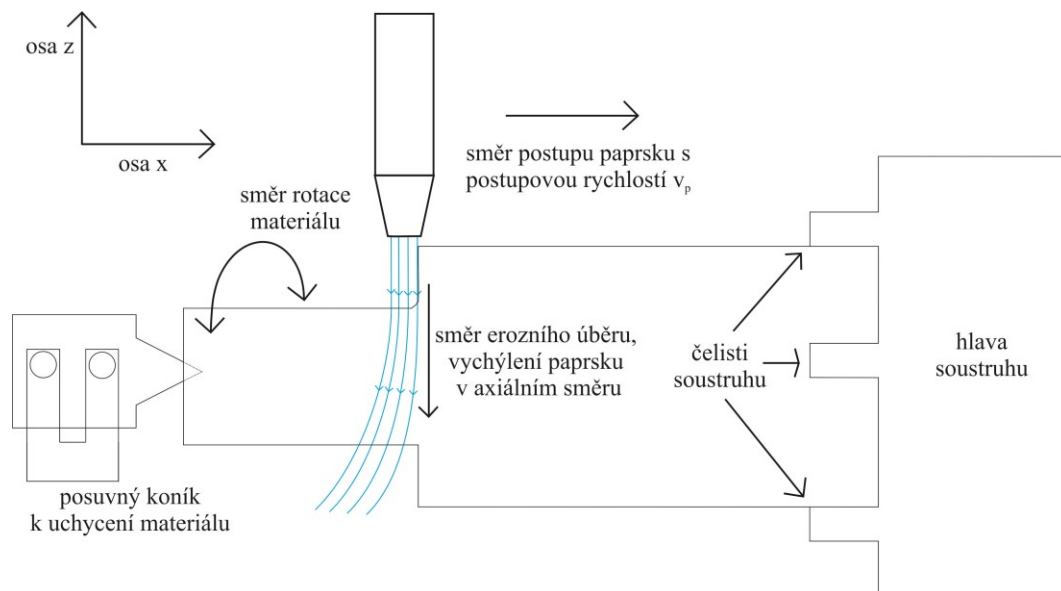
Mimo uvedených procesních parametrů lze určit i parametry charakterizující výslednou kvalitu povrchu materiálu. Mezi tyto parametry se řadí:

- Drsnost a vlnitost povrchu
- Úhel striací
- Velikost zpoždění paprsku - trailback (obr. 5)
- Velikost zkosení stěn - taper (obr. 6)

3 SOUHRN PARAMETRŮ AWJT

3.1 Princip a rozdělení AWJT

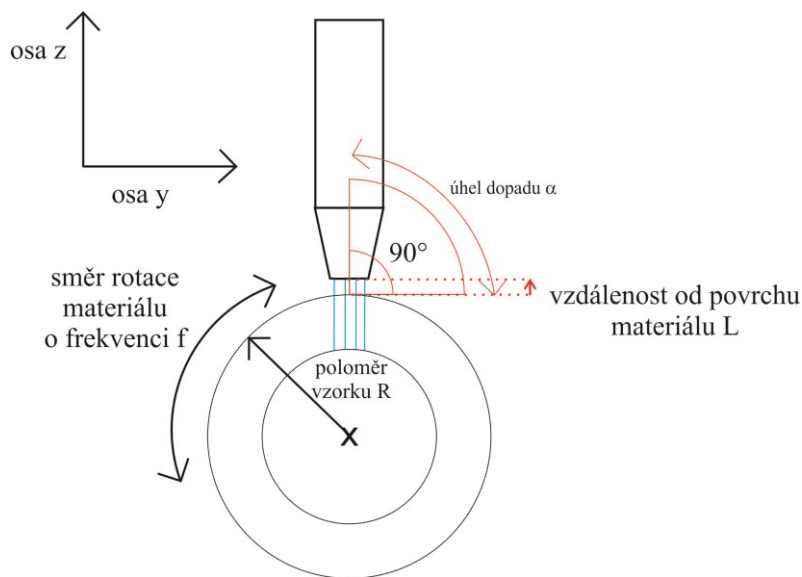
Soustružení je proces, při kterém obrobek koná rotační pohyb a řezný nástroj provádí posuv do materiálu. Postupně je po obvodu materiál ubírán řezným nástrojem (konvenční soustružení) nebo jinou (flexibilní) metodou úběru materiálu (např. AWJT na obrázku 9).



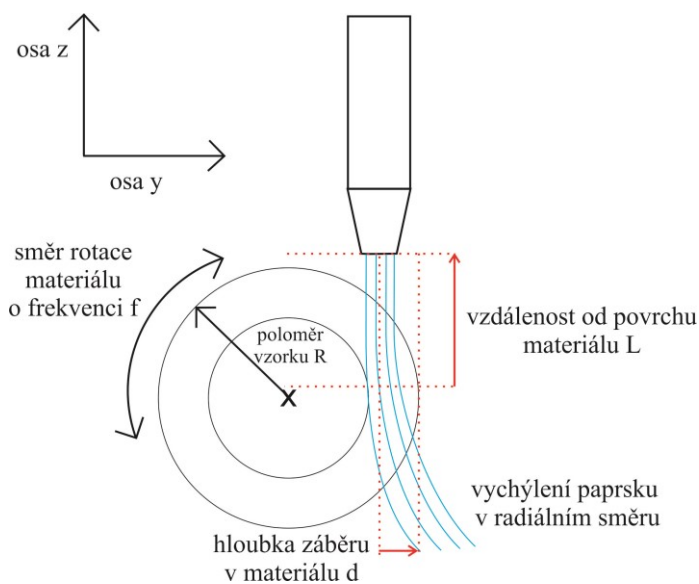
Obr. 9. Schéma soustružení abrazivním vodním paprskem

Oproti řezům paprskem i konvenčnímu soustružení je mimo jiné rozdíl v tom, že relativní pozice usměrňovací trubice vůči materiálu se dá volit téměř libovolně, přičemž ve všech těchto pozicích bude docházet k úběru materiálu. Z tohoto hlediska byl proces soustružení AWJT rozdělen na dvě hlavní metody obrábění:

- Radiální mód (obr. 10) – pozice paprsku je v ose y konstantní, dochází k pohybu v ose x ve směru postupové rychlosti nebo v ose z (nastavování vzdálenosti materiálu od trysky, obr. 10). Tento mód lze dále rozdělit na normálový mód, kdy paprsek dopadá pod úhlem 90° nebo šikmý mód, kde úhel dopadu paprsku je volitelný až do jisté limitní hodnoty. Při obrábění pomocí tohoto módu dochází jak k řeznému tak i deformačnímu úběru. V současné době se podle rešerší zdá být méně používaným módem AWJT. Jeho vyšší efektivitu mimo jiné komplikuje fakt, že stále není možné dostatečně odhadnout hloubku řezu v materiálu pomocí zadaných parametrů.
- Tangenciální mód (obr. 11) – pozice paprsku v ose y není definována stejně pro jakýkoliv řez, ale určuje se hloubka záběru v materiálu. Tangenciální mód by se dal dále rozdělit na jednorůchodový úběr materiálu a víceprůchodový úběr (téměř stejná trajektorie paprsku je absolvována vícekrát, přičemž se ale pro každou iteraci zvyšuje hloubka záběru v materiálu). Při nízkých hloubkách záběru dominuje řezný úběr nad deformačním. Pozitivem je lépe kontrolovatelný výsledný průměr vzorku a lepší kvalita obrobce. Na druhou stranu je při nízkých hloubkách záběru obrábění pomalé s nízkou rychlostí úběru materiálu.



Obr. 10. Radiální mód s některými parametry



Obr. 11. Tangenciální mód s některými parametry

Jelikož AWJT je odlišné od řezání paprskem, je nejprve nutné zvolit parametry procesu, určit jejich významnost a vliv na efektivitu procesu. Množství z nich se dá převzít z modelu AWJ uvedeného v předchozí kapitole. Některé parametry se liší v závislosti na uvedeném módu, tyto tedy budou rozebrány dále odděleně. Oproti řezu, lze pro oba způsoby definovat nové, jednoduše měnitelné a většinou stále parametry v průběhu procesu, související s pozicí a otáčivým pohybem materiálu. Naopak oproti klasickému řezu nebyly definovány pro AWJT parametry ohodnocující kvalitu povrchu trailback, taper a úhel striací. Místo tloušťky materiálu se používá průměr nebo poloměr vzorku u kruhových průřezů.

Komplikací hodnocení procesu je, že dopadový úhel paprsku se v průběhu procesu liší a je proto nutno s ním počítat jako s proměnným parametrem. Z dosavadních publikací je patrné, že modely AWJT jsou především statistické a tudíž jsou omezeny uvedenými experimentálními podmínkami. Analytické modely byly publikovány pouze v několika málo článcích. Tato práce si klade za cíl ohodnocení a testování jednotlivých parametrů, což může v budoucnu vést k tvorbě modelu AWJT. Výstupem studovaných proměnných jsou výkonnostní a kvalitativní parametry procesu AWJT:

- průměr vzorku po obrábění
- drsnost a vlnitost povrchu materiálu
- kruhovitost vzorku osoustruženého z jiného než kruhového původního průřezu
- rychlost úběru materiálu (MRR)
- geometrická chyba (rozdíl požadovaného průměru vzorku od průměru získaného)
- změny mechanických a metalurgických vlastností materiálu

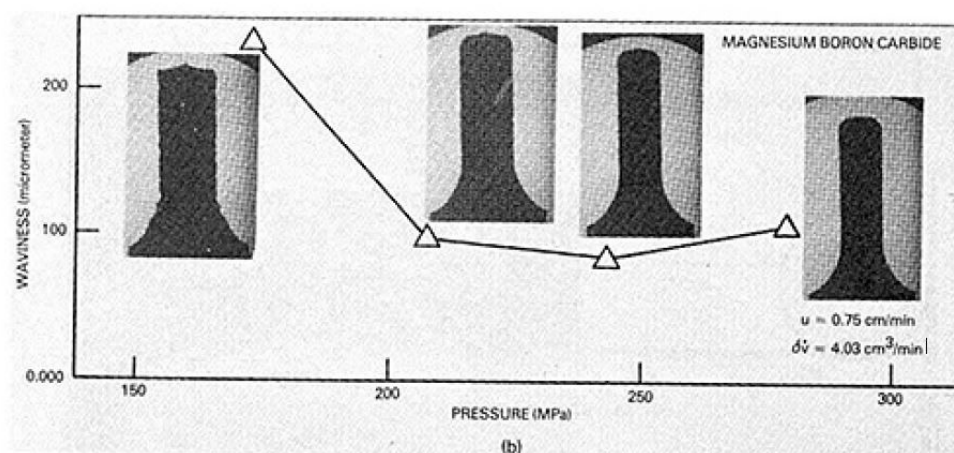
3.2 Významné měnitelné parametry soustružení a jejich vliv na proces AWJT

3.2.1 Vliv tlaku vody

Již z uvedené Bernoulliho rovnice 1.1 v předchozí kapitole je jasné, že tlak je důležitým výkonnostním parametrem a jeho zvyšování vede ke zvyšování energie čistého abrazivního paprsku. Lze tedy očekávat, že s narůstajícím tlakem se bude rychlost úběru materiálu (dále MRR) zvyšovat. V tangenciálním módu předpokládám snížení drsnosti i vlnitosti povrchu materiálu se zvyšujícím se tlakem, vlivem efektivnějšího úběru materiálu v okrajových částech profilu paprsku. Je nutné ovšem zmínit, že při nastavení tlaku je nutné dodržet jisté hodnoty v závislosti na průtoku abraziva.

Hashish v první práci v tangenciálním módu lineárně soustružil kruhové vzorky hliníku a kovového kompozitu karbidu bóru s hořčíkem a sledoval vliv na vlnitost povrchu [4]. V případě měkkého hliníku nedošlo při zvýšení tlaku (z 207 MPa na 276 MPa) k velkým změnám vlnitosti ani k podstatně vyššímu množství ubraného materiálu. Autor zmiňoval limitní hodnotu tlaku (související s ostatními parametry), nad níž se již efektivita procesu nezvyšuje.

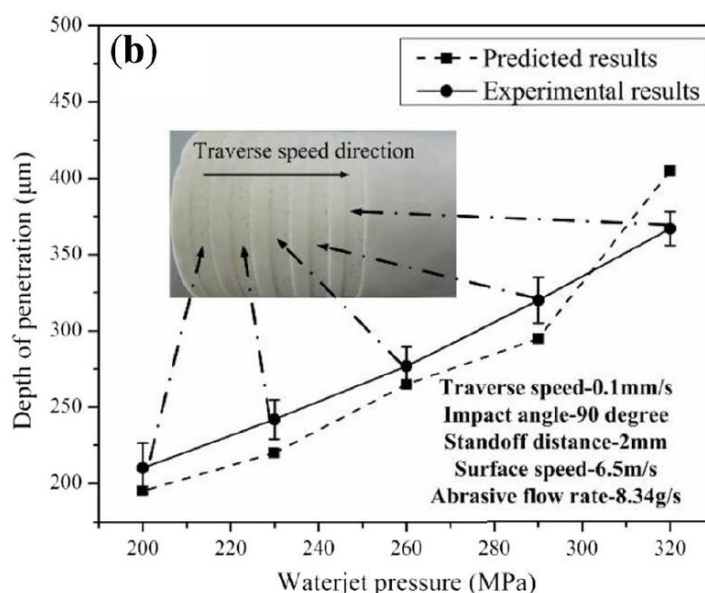
V případě tvrdého karbidu bóru došlo při zvýšení tlaku (z 241 MPa na 276 MPa) ke zvýšení vlnitosti (obr. 12). Tento jev lze nejpravděpodobněji vysvětlit tím, že čím je úběr materiálu efektivnější, tím více je paprsek choulostivý na změny (nestability) v rychlosti posuvu.



Obr. 12. Změny vlnitosti vzorku karbidu bóru při změnách tlaku [4]

Dále byl testován vliv tlaku při proměnných hloubkách záběru lineárního posuvu tangenciálního módu na rychlost úběru hliníkových vzorků. Tato rychlost naráží na svoje limity při vysokých tlacích, jelikož zde již není materiál, který by šel obrobit [17]. Byl zaveden pojem volume sweep rate, což je maximální hodnota rychlosti úběru materiálu (MRR) pro danou postupovou rychlost a hloubku záběru v materiálu (viz obr. 11). Zhong a Han měřili drsnost a vlnitost na vzorcích skla soustružených pomocí tangenciálního módu AWJT se dvěma průchody paprsku [18]. Při zvyšování tlaku docházelo k nárůstu drsnosti i vlnitosti povrchu, což je opět připisováno nestabilitám v rychlosti posuvu paprsku a průtoku abraziva.

K předpovědi hloubky penetrace paprsku v keramice z oxidu hlinitého (není ovšem jasné, jestli jde o tangenciální nebo radiální mód) byl vytvořen model pomocí metody konečných prvků, přičemž předpovězené hodnoty byly relativně ve shodě s experimentálními výsledky (obr. 13) [19].



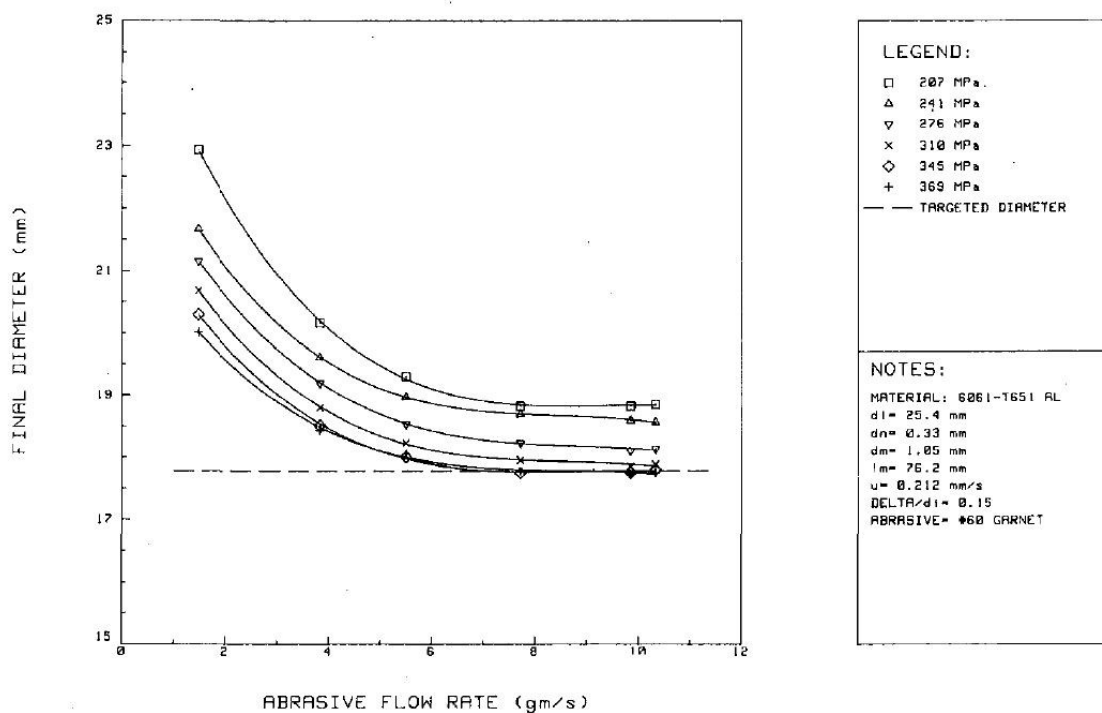
Obr. 13. Predikce výsledné hloubky řezu v závislosti na použitém tlaku [19]

Weiyi studoval obrábění PEEK (semi – krystalický plast Polyetereterketon) vyztuženého karbonovými vlákny v radiálním módu AWJT [20]. Drsnost s rostoucím tlakem narůstala, což v tomto konkrétním případě souvisí s tím, že drsnost koreluje s hloubkou penetrace a méně kvalitním deformačním erozivním úběrem.

3.2.2 Vliv průtoku abraziva

Protože eroze při procesech AWJ je způsobena dopady jednotlivých abrazivních částic, měl by mít zvyšující se hmotnostní průtok abraziva do jisté hodnoty pozitivní efekt na rychlost úběru materiálu, ale i na vlnitost nebo drsnost. Tuto domněnku podporují i vztahy 1.12 a 1.13 v první kapitole.

Hashish pozoroval během tangenciálního soustružení snižování vlnitosti povrchu karbidu bóru při zvýšení průtoku abraziva až do jisté limitní hodnoty průtoku [4]. Tato limitní hodnota byla dobře vidět při soustružení hliníkových vzorků (obr. 14). Nižší hybnost předaná částicím abraziva při jejich zvyšujícím se průtoku znamenala nedosažení stanoveného průměru vzorku [17].



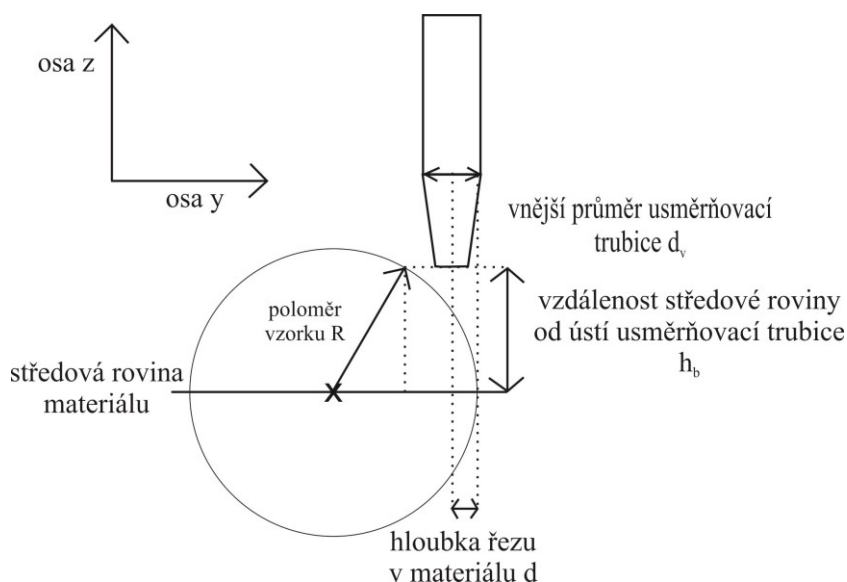
Obr. 14 Pozorovaná limitní dosažená hodnota úběru materiálu pro dané tlaky a průtoky abraziva

Výzkumníci z University of New South Wales testovali soustružení v radiálním módu s jedním průřechem na pevných ocelových vzorcích [21]. Bylo zjištěno, že při tlaku 380MPa a zvyšování průtoku abraziva ze 4 g/s na 8 g/s došlo k podstatnému zvýšení MRR. Na druhou stranu při použití 200 MPa byl zaznamenán mírný pokles MRR s rostoucím průtokem abraziva. Tento jev lze vysvětlit nedostatečným předáváním hybnosti vody abrazivu.

3.2.3 Vliv vzdálenosti ústí usměrňovací trubice od povrchu materiálu

V modelu z kapitoly 1 bylo zmíněno jádro paprsku, obsahující většinu energie nutné k erozi a jeho zužování až vymizení s narůstající vzdáleností. Na paprsek při průchodu okolním prostředím působí odporová síla snižující jeho energii, což obecně znamená, že vyšší vzdálenost souvisí s nižší MRR. Parametr je nutno odlišit pro oba módy AWJT.

Tangenciální mód – Nastavení parametru je omezeno vzhledem k ochraně usměrňovací trubice paprsku. Nejjednodušším a nejbezpečnějším způsobem je umístění ústí usměrňovací trubice 2 mm nad střed povrchu obráběného materiálu a následně provést posuv do požadované hloubky záběru. Na druhou stranu je efektivnější, pokud je to možné vzhledem k rozměrům materiálu a hloubce záběru, vypočítat nižší výškovou bezpečnou vzdálenost od povrchu. Pomocí vztahu 3.1 jsme schopni vypočítat pro námi určenou hloubku záběru potřebnou výšku od středové roviny materiálu, která je definována podle obrázku 15.



Obr. 15. Vizualizace výšky usměrňovací trubice nad materiálem

$$h_b = \sqrt{R^2 - \left(d - R + \frac{1}{2}d_v + b\right)^2} \quad (3.1)$$

Veličina b v rovnici 3.1 představuje námi definovanou bezpečnou boční vzdálenost povrchu materiálu a kraje usměrňovací trubice ve stejné výšce. Jednou z nevýhod tohoto vztahu je, že nedefinuje přesnou vzdálenost usměrňovací trubice od povrchu materiálu. Tuto vzdálenost lze získat vztahem 3.2.

$$L = h_b - \sqrt{R^2 - (R - d)^2} \quad (3.2)$$

L je vzdálenost středu usměrňovací trubice a povrchu materiálu pro předem definovanou hloubku záběru d v materiálu. Problémem obou uvedených vztahů je jejich limitované použití při větších hloubkách záběru. Je zřejmé, že do oboru hodnot vzdálenosti od středové roviny patří nula

až poloměr vzorku R . To znamená, že limitní hodnota této veličiny je rovna poloměru vzorku. Při překročení této hodnoty již vztah není dále platný. Omezující podmínka je vyjádřena vztahem 3.3.

$$d = R - \frac{1}{2}d_v - b \quad (3.3)$$

Ve srovnání s AWJ řezem, kde je nutno dodržovat určitou vzdálenost ústí usměrňovací trubice od povrchu materiálu, je dle předchozích vztahů proměnná. To může být problém především při nárůstu hloubky v řezu, kde dochází k velkému poklesu této vzdálenosti a tudíž i možným problémům se samotným řezem v materiálu.

Pokud bychom chtěli používat velké hloubky záběru nebo kontrolovat vzdálenost trysky od materiálu ve všech směrech, je zapotřebí volba vhodného kompromisu mezi výškovou vzdáleností trubice od materiálu (osa z) a bezpečnou boční vzdáleností trubice od materiálu (osa y). K tomu lze použít parametrické souřadnicové rovnice 3.4 až 3.7 a jejich geometrické zobrazení do grafu (obr. 16).

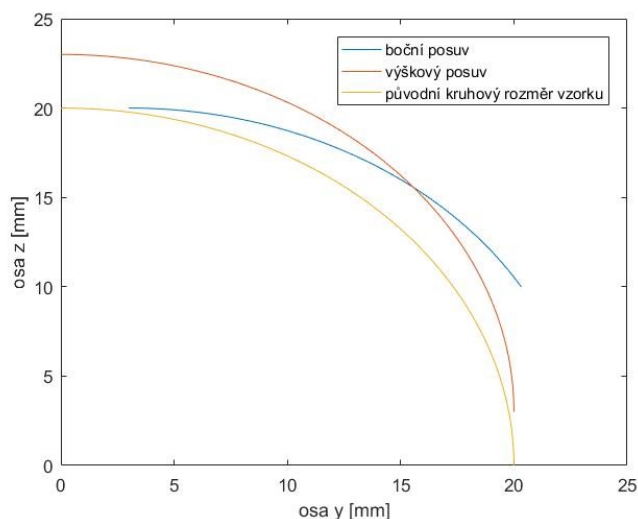
$$y_b = R \cdot \cos \alpha + C \quad (3.4)$$

$$z_b = R \cdot \sin \alpha \quad (3.5)$$

$$y_h = R \cdot \cos \alpha \quad (3.6)$$

$$z_h = R \cdot \sin \alpha + L \quad (3.7)$$

Rovnice 3.4 a 3.5 vyjadřují souřadnice takového bodu, jež splňuje podmínku bočního odstupu usměrňovací trubice od materiálu o velikosti C . Rovnice 3.6 a 3.7 definuje souřadnice bodů, které dodržují výškový odstup usměrňovací trubice od povrchu materiálu o velikosti L od středu usměrňovací trubice.



Obr. 16. Zobrazení vzdáleností od povrchu materiálu v obou směrech ($L = 3$ mm, $C = 3$ mm a $R = 20$ mm)

Z obrázku 16 je patrné, že od kraje materiálu až do jistého bodu, kde dojde k protnutí obou křivek, nelze použít hodnoty výškového odstupu, jelikož by nebyl dodržen odstup boční. V tomto případě lze brát vzdálenost středové roviny od ústí usměrňovací trubice jako z_b a pro hloubku řezu v materiálu platí:

$$d = R - y_b \quad (3.8)$$

Pro hloubku záběru větší než je průnik obou křivek nelze použít boční odstup, jelikož by nebyl dodržen výškový odstup. Pro tuto hloubku záběru, kterou lze získat rovnicí 3.9 je možno použít vzdálenost trubice od středové roviny, která je rovna z_v .

$$d = R - y_v \quad (3.9)$$

Experimenty v tangenciálním módu soustružení s proměnnou vzdáleností ústí usměrňovací trubice od povrchu materiálu provedli Zhong a Han na skleněných vzorcích [18]. Při zvyšování této vzdálenosti z 1 mm na 4 mm došlo ke zvýšení drsnosti z 25 μm na přibližně 28 μm (dva průchody s hloubkou záběru 1 mm).

Axinte experimentálně určil průměr stopy paprsku (rovnice 3.10) v závislosti na vzdálenosti ústí trysky od středové roviny materiálu tak aby mohl přesněji odhadnout výsledný průměr vzorku obráběných brusných kotoučů [22]. Byl použit tlak maximálně 344 MPa, průměr trysky 0,3 mm a průměr usměrňovací trubice 1,1 mm.

$$D = 0,0482h_b + 1,234 \quad (3.10)$$

Radiální mód – vzdálenost je volena co nejbližší povrchu materiálu pro nejvyšší efektivitu procesu, v čemž spočívá výhoda oproti tangenciálnímu módu.

3.2.4 Vliv frekvence otáčení vzorku a směru rotace materiálu

Frekvence otáčení je veličina, díky které lze vyjádřit obvodovou rychlost povrchu materiálu vůči ose otáčení materiálu, při známém poloměru obráběného vzorku (rovnice 3.11).

$$v_o = 2\pi Rf \quad (3.11)$$

Pomocí vztahu 3.12 je možno určit počet otáček, které absolvuje každá část materiálu při průchodu paprsku o průměru D.

$$N = f \frac{D}{v_p} \quad (3.12)$$

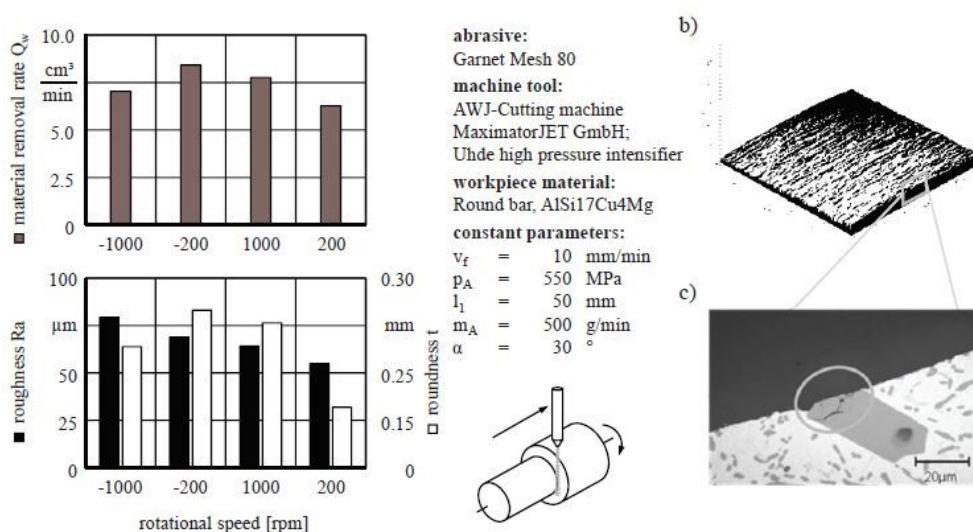
Pro zajištění minimální požadované kvality povrchu, musí být frekvence otáčení s postupovou rychlostí v určité relaci. Dále je nutno odlišovat působení veličin podle zvoleného módu AWJT.

Tangenciální mód - Veličina se zdá mít značný význam vzhledem k tomu, že řídí dobu působení AWJ na jednotlivé části materiálu. Při stálosti zbylých parametrů lze odhadovat, že se zvyšující se frekvencí otáčení dochází ke snižování rychlosti úběru materiálu. Nicméně na druhou stranu je možné v případě rotace proti směru působení paprsku uvažovat vyšší relativní rychlost povrchu materiálu

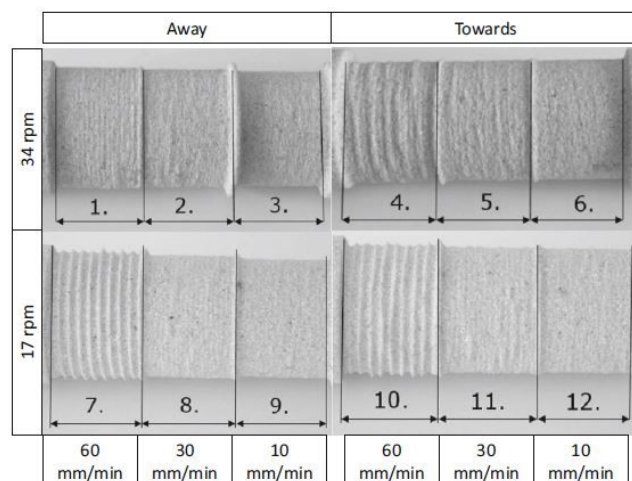
vůči postupujícímu paprsku a tedy je možná vyšší rychlost úběru materiálu s rostoucí frekvencí otáčení.

Ve většině experimentů byl použit směr rotace totožný se směrem působení paprsku. Důvody nejčastěji uvedené pro toto nastavení jsou, že kvalita povrchu při obrábění proti směru působení paprsku je nižší než v opačném případě.

Hashish pozoroval snížení rychlosti úběru materiálu v tangenciálním – módu AWJT při působení paprsku ve směru rotace při zvyšování frekvence otáčení [4]. Při obrábění skla bylo dosaženo se zvyšující se frekvencí otáčení nižší drsnosti povrchu materiálu [18]. Experimenty s těžko obrobitelnými materiály provedl Uhlmann [23], který porovnával mimo jiné vliv frekvence otáčení a směru otáčení na rychlost úběru materiálu a drsnost povrchu. Obráběnými materiály byla slitina hliníku s titanem a silumin AlSi17Cu4Mg. Z obrázku 17 je vidět, že k nejvyšší rychlosti úběru materiálu došlo při nejnižší frekvenci otáčení (200 ot./min, $8,5 \text{ cm}^3/\text{min}$) a zároveň směru rotace proti působení AWJ. Lze vidět, že drsnost materiálu byla nejnižší při nejnižší frekvenci otáčení a rotaci ve směru působení paprsku. Z obrázku vyplývá, že při použití nastavení s nejvyšší rychlostí úběru materiálu v souvislosti s frekvencí otáčení, dochází bohužel ke zvýšení hodnot drsnosti i kruhovitosti vzorku. Lehocká a kolektiv testovali obrábění pískovcových vzorků při změně frekvence otáčení a směru rotace materiálu (hloubka záběru 2 mm, průměr vzorku 50 mm) [24]. Výsledky experimentu jsou dobře patrné z obrázku 18.



Obr. 17. Srovnání různých frekvencí otáčení materiálu a směru rotace [23]

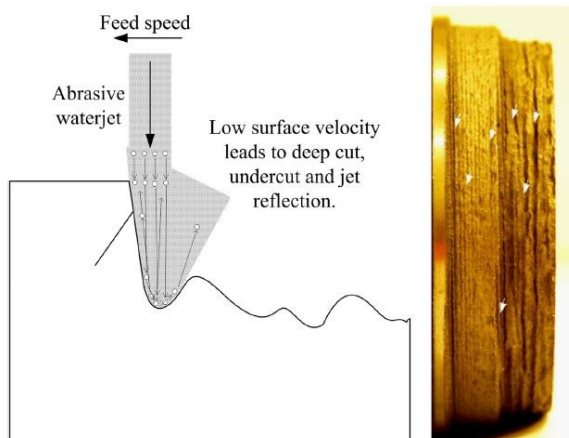


Obr. 18. Vliv směru rotace a frekvence otáčení při soustružení pískovce [24]

Radiální mód – Frekvence otáčení, jak již bylo zmíněno výše, reguluje dobu působení paprsku. V radiálním módu, kde neexistuje spolehlivá předpověď hloubky průniku paprsku do materiálu, je možné, že by vysoká rychlost otáčení mohla být vhodnou volbou pro jednodušší odhad výsledného průměru vzorku.

Jedna ze studií vlivu parametrů během radiálního soustružení velmi pevných ocelí byla provedena na The University of New South Wales [21]. Při testování změn rychlosti povrchu (do 3 m/s) vysoce pevnostní oceli (průměr 59 mm) bylo zjištěno, že při zbylých konstantních parametrech narůstá s rotační rychlostí hloubka řezu v materiálu (při nízkých postupových rychlostech), až do jisté limitní hodnoty a s narůstající frekvencí otáčení se již výrazně nezvyšuje [21]. Autor jev vysvětluje následovně: Při obrábění materiálu vznikají v hloubce průniku podřezy (obr. 19). Tyto podřezy především při nízkých rychlostech povrchu odrážejí obrobené částice, kousky abraziva a vodu zpět proti postupujícímu paprsku [21]. Oproti tomu vysoká frekvence minimalizuje kontakt abraziva s materiálem tak, že dochází k ubírání jenom po minimálních částech. Autor uvádí, že postupující paprsek má i „leštící“ efekt na povrch materiálu. Při nižší frekvenci je tento efekt snížen, a tudíž je tím i vysvětlena vyšší drsnost materiálu [21].

Zhongbo s kolektivem testoval vliv rychlosti povrchu trubek z oxidové keramiky oxidu hlinitého (průměr 70 mm) na MRR v rozsahu 1,5 až 9,5 m/s [25]. Nejvyšší MRR bylo dosaženo při rychlosti přibližně 6 m/s (cca 820 ot./min). Hloubka řezu od této hodnoty klesala až k extrémně nízkým hodnotám na jednu otočku (1 μ m). Klesající rychlost povrchu měla podobný efekt.



Obr. 19. Podřezy vznikající během radiálního soustružení [21]

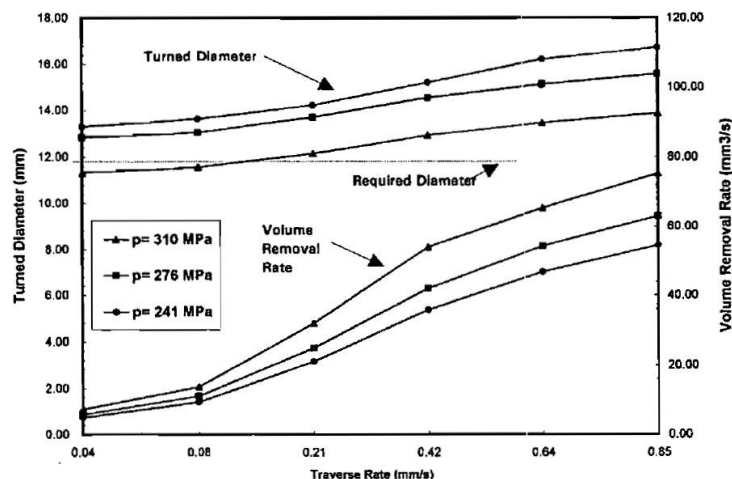
3.2.5 Vliv postupové rychlosti paprsku

Postupová rychlost paprsku po povrchu obráběného materiálu je zásadním parametrem jak z hlediska kvality výsledného povrchu, tak i rychlosti úběru materiálu. Podobně jako frekvence otáčení definuje dobu působení paprsku na materiál. Je zřejmé, že s klesající hodnotou postupové rychlosti bude probíhat více interakcí částic abraziva s povrchem obráběného materiálu (více se projeví i okrajové části paprsku) a úběr materiálu bude vyšší (jak je patrné i ze vztahu 2.13 v předchozí kapitole).

Vzhledem k praktičnosti je právě postupová rychlost nejčastější proměnnou veličinou, pomocí níž se reguluje hloubka průniku při řezání. Spolu s úhlem náklonu paprsku je regulována tak, aby dokázala korigovat vady požadovaného tvaru výrobku, a zajišťuje danou kvalitu povrchu materiálu.

V případě soustružení je pro efektivní využití energie paprsku nutno zvolit vhodnou postupovou rychlost vzhledem k několika dalším parametrům. Pro tangenciální mód platí, že pokud je hloubka záběru v materiálu nízká a postupová rychlost dosahuje malých hodnot, dojde k nevyužití většiny energie paprsku (v tomto případě tedy dochází se zvyšující se postupovou rychlostí ke zvyšování rychlosti úběru materiálu). Pokud bychom zvolili nízkou frekvenci otáčení a vysokou postupovou rychlost, můžeme pozorovat, že paprsek nebude téměř působit na část povrchu materiálu. To by mohlo značně snížit kvalitu povrchu a zkreslit jeho výsledný tvar. V případě radiálního módu lze očekávat zvýšenou rychlost úběru se snižující se postupovou rychlostí a zhoršení kvality povrchu (s narůstající hloubkou průniku paprsku se zhoršuje kvalita povrchu, probíhá deformační úběr materiálu).

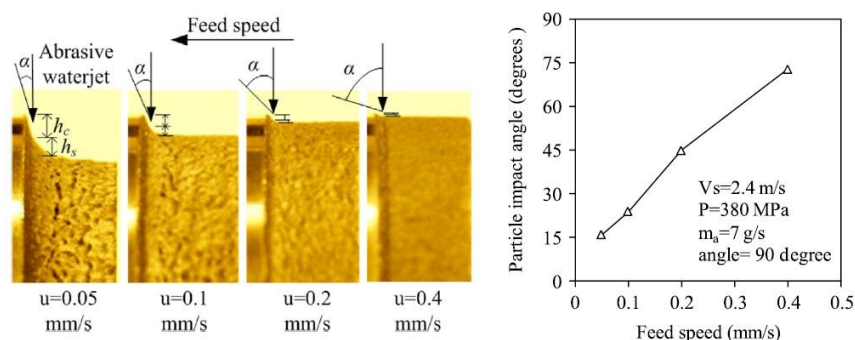
Hashish ve své první práci týkající se AWJT tangenciálního módu pozoroval zvyšování jak vlnitosti, tak i MRR při zvyšování postupové rychlosti paprsku (testovanými materiály byl hliník a karbid bóru) [4]. V dalším článku zavedl pojem volume sweep rate, což je teoretická hodnota definující maximální možný obrobený objem materiálu pro danou postupovou rychlost a hloubku záběru [17]. Při tangenciálním soustružení kompozitu Mg/B₄C pozoroval při nízkých postupových rychlostech a vysokých tlacích menší než požadovaný průměr vzorku a naopak při vysokých postupových rychlostech větší průměr materiálu (obr. 20) [26]. Původní průměr materiálu byl 17 mm a hloubka řezu 2,53 mm.



Obr. 20. Vliv postupové rychlosti na výsledný průměr vzorku [26]

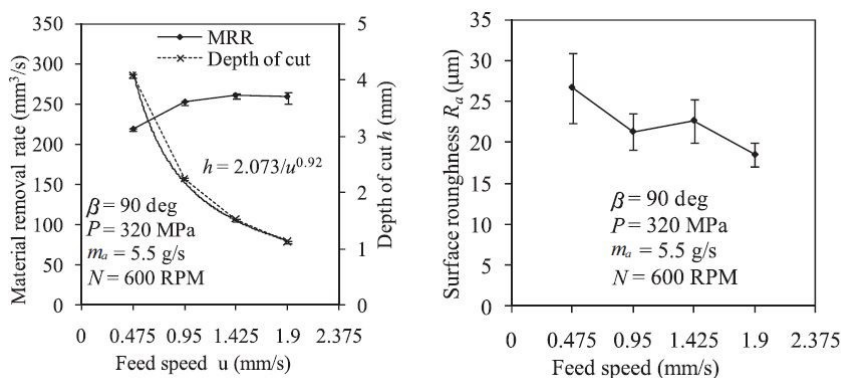
Na závěr článku je zmíněn jako nejefektivnější nastavení úběru materiálu vysoká rychlost průchodu paprsku v kombinaci s více průchody materiálem. Podobný jevy jako Hashish pozoroval i Cárach a spol. při soustružení niklových slitin při vyšších postupových rychlostech [27]. R. Manu a R. Manesh poukazují ve své práci, že aby byl proces AWJT použitelný, je zapotřebí, aby posuv paprsku v axiálním směru byl rozměrově velký jako zlomek průměru paprsku a došlo k více průchodům stejné části materiálu [28]. Lehocká a spol. testovali postupovou rychlost a i v souvislosti s rotační frekvencí na pískovcových vzorcích [24]. Ve své práci pozorovali jev nedostatečného průchodu paprsku (obr. 18) při rostoucí posuvné rychlosti. Kvalita povrchu dle jejich měření s narůstající postupovou rychlostí klesá.

Li a spol. pozorovali zvyšování rychlosti úběru vysoce pevnostních ocelí při snížené postupové rychlosti (rozmezí od cca 0,1 mm/s do 0,4 mm/s, snížení rychlosti úběru z 35 mm³/s na cca 15 mm³/s). Jednalo se o radiální mód soustružení s parametry průtoku abraziva 7 g/s, tlaku 380 MPa a frekvencí otáčení 400 ot./min. Podle jejich vizualizace se mění s postupovou rychlostí sklon materiálu, na který paprsek dopadá (obr. 21). Vyšší množství ubraného materiálu spojují i s tím, že při nižších rychlostech je úhel dopadu nižší. Dle Finnieho teorie eroze je při nižších úhlech dopadu zajištěn lepší úběr materiálu (model je koncipován pro kujné materiály a nízký úhel napomáhá řeznému úběru materiálu) [21].



Obr. 21. Vliv postupové rychlosti na dopadový úhel paprsku [21]

V další studii byl testován vliv postupové rychlosti na vzorky kompozitu plastu PEEK s karbonovými vyztužujícími vlákny [20]. Na rozdíl od výše uvedené testované oceli, pozorovali při zvýšené postupové rychlosti (rozmezí od 0,5 do 1,9 mm/s) zvyšující se rychlost úběru materiálu. Průtok abraziva byl 5,5 g/s, tlak 320 MPa a frekvence otáčení 600 ot./min. Dále došlo ke snížení průniku paprsku v materiálu (obr. 22) [20]. Rozdílné chování oproti oceli je popsáno jako efekt křehkosti i kujnosti tohoto kompozitního materiálu. Drsnost s narůstající postupovou rychlostí klesala.



Obr. 22. Vliv postupové rychlosti na úběr kompozitu PEEK vyztuženého vlákny a kvalitu povrchu [20]

3.2.6 Vliv hloubky záběru v materiálu, úhel dopadu paprsku na materiál

Hloubka záběru v materiálu je parametr definovaný výhradně pro tangenciální mód soustružení paprskem (viz obr. 11). Při jednom průchodu paprskem materiálem se jedná o parametr konstantní v rámci námi požadovaného soustruženého tvaru vzorku. Zdá se, že častější způsob soustružení je realizován více průchody paprsku materiálem. Je opakována stejná trajektorie až do výsledného požadovaného tvaru s tím, že je dán předem krok postupu hloubky záběru v materiálu s každým novým průchodem. Hloubka záběru dále souvisí s dopadovým úhlem paprsku (úhel mezi tečnou k povrchu materiálu a směrem šíření paprsku) což lze vyjádřit vztahem 3.13 [28].

$$\delta = \arccos\left(\frac{R-d}{R}\right) \quad (3.13)$$

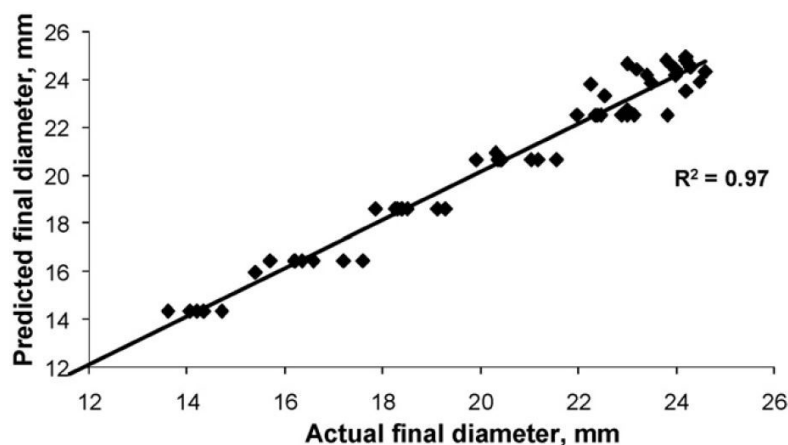
Úhel dopadu je v průběhu procesu proměnný, což má dle Finnieho teorie eroze vliv na objem ubraného materiálu [28]. Abychom mohli modelovat tuto veličinu, je nejprve zapotřebí správně ohodnotit změnu poloměru vzorku a tudíž rychlost úběru samotného materiálu. Je možné, že s narůstající hloubkou se bude zvyšovat rychlost úběru materiálu jednoduše proto, že paprsek bude mít větší plochu působnosti. Mimo to jsou dopadové úhly vyšší při vyšších hloubkách záběru, což může mít pozitivní vliv na rychlost úběru materiálu.

Hloubka záběru jako parametr soustružení byla testována Hashishem. Z experimentu vyplývá, že změna hloubky záběru v karbidu bóru zvyšuje rychlost úběru materiálu. Vlnitost takto obrobeného povrchu se však v zásadě nijak významně neliší a je spojována spíše se stabilitou jiných parametrů paprsku jako je postupová rychlost [4]. Nejvyšší rychlost úběru byla 5,37 cm³/min (průměr vzorku 2,5 cm a hloubka záběru 0,95 cm). Zhong a Han použili při řezání skla hloubku záběru 1 mm (průměr vzorku 2,5 cm), přičemž šlo o dva průchody paprskem.

Axinte a spol. testoval soustružení brusných kotoučů. Hloubku záběru rozdělil podle průměru paprsku následovně [22]:

- Hloubka záběru (boční posuv + poloměr paprsku) je menší než průměr paprsku – nízká rychlost úběru materiálu, je zapotřebí více následujících řezů v materiálu (pořád lepší než konvenční obrábění brusných kotoučů).
- Hloubka záběru větší než průměr paprsku (autor zmiňuje v souvislosti s tímto nastavením pouze křehké a porózní materiály) – tento přístup umožňuje dosažení velkých rychlostí úběru materiálu, přičemž je možno použít pouze jeden průchod paprsku (nedochází k výraznému negativnímu ovlivnění přesnosti obráběného kotouče).

V závěru článku autor navrhuje použít hloubku záběru vyšší než průměr paprsku s tím, že pro zlepšení kvality povrchu je na závěr možno provést ještě jeden korekční průchod paprsku s nízkou hloubkou [22]. Manu a Babu experimentálně ověřovali model s proměnnou hloubkou záběru (postupně 1, 2, 3, 4, 5 mm) [28]. Původní průměr vzorku měl 25,4 mm a srovnání predikovaných a naměřených hodnot lze vidět z obrázku 23.



Obr. 23. Modelované a reálné hodnoty průměru slitiny hliníku [28]

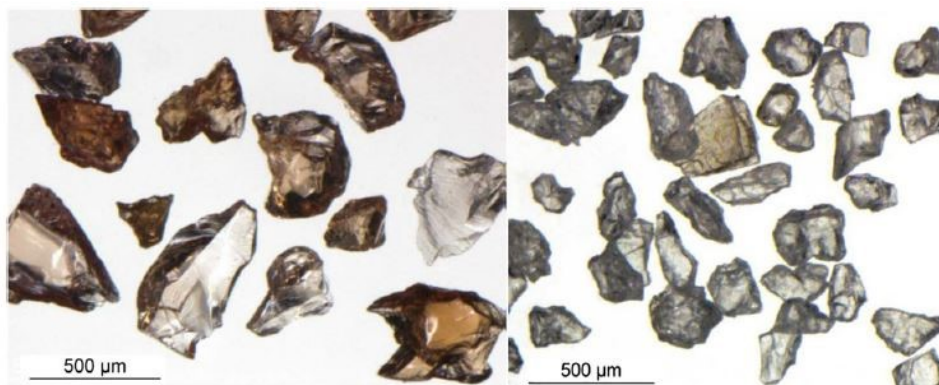
Hlaváček a spol. soustružili vzorky pískovce o průměru 50 mm s dobrou kvalitou povrchu (závislá především na ostatních parametrech), při hloubce záběru 2 mm [24]. Další z experimentů byl proveden na hliníkových kompozitech, přičemž pro průměr vzorku 14,5 mm byla použita hloubka záběru 2 mm [29].

3.3 Parametry nevhodné k postupné změně v průběhu obrábění

3.3.1 Vliv velikosti abrazivních částic, druhu abraziva

Velikost částic abraziva je zahrnuta v uvedeném modelu kapitoly 1, v koeficientech, jež definují efektivitu procesu směšování abrazivních částic s kapalinou (rovnice 2.3). Vzhledem k nárazu kapaliny o vysoké rychlosti, není původní velikost abraziva zachována. Výsledkem této interakce je určité rozdělení velikostí částic abraziva v paprsku, přičemž na tyto velikosti má vliv i kvalita dodávaného abraziva (vnitřní poruchy a napětí v částicích abraziva). Velikost dále musí být vhodně zvolena vzhledem k průměru usměrňovací trubice a průměru trysky paprsku. Předpokládá se vyšší úběr materiálu jedním zrnem s narůstající střední velikosti abraziva. Velikost má velký vliv na kvalitu obrobeného povrchu, především jeho drsnost.

Nejčastěji používaným materiálem abrazivních částic je granát (obr. 24 vlevo). Při volbě vhodného druhu abraziva k obrábění daného materiálu je podstatná kromě vlastností materiálu jako tvrdost i pořizovací cena materiálu a celková ekonomická stránka procesu. Se zvyšující se tvrdostí abrazivních částic by se dal očekávat snazší a vyšší úběr materiálu.



Obr. 24. Mikroskopický obrázek granátu (vlevo) a olivínu [29]

Dle Hashishe (tangenciální mód) s klesající velikostí abrazivních částic narůstá vlnitost povrchu materiálu [4]. Tu dále autor zmiňuje jako důsledek makroskopické nestálosti jiných parametrů paprsku (tlak například) a penetrační sekvence paprsku. Lze tedy předpokládat částečnou kompenzaci vlnitosti při vyšší velikosti abrazivních částic. Na druhou stranu v důsledku dopadů jemnějších částic abraziva dochází k tvorbě hladšího povrchu a tím pádem ke snížení drsnosti. Pokud ovšem přetrvávají negativní vlivy spojené s nestálostí paprsku, autor tvrdí, že jemnější abrazivo pouze snižuje drsnost mezi jednotlivými striacemi [4].

Jako maximální tlak, kdy již nedochází k významné fragmentaci částic vlivem směšovacího procesu byla určena hodnota 207MPa [17]. Mimo to byl zkoumán vliv na rychlost úběru materiálu při použití granátu z Idaha o velikosti 60 MESH, 80 MESH a 100 MESH v tangenciálním módu. Nebyla pozorována podstatná změna mezi rychlostí úběru abrazivem o velikosti MESH 60 a MESH 80. Navzdory tomu se tento rozdíl zvyšoval s narůstající postupovou rychlostí i tlakem. Srovnáním abraziva 60 MESH a 100 MESH však byl pozorován mnohem vyšší rozdíl v rychlosti úběru materiálu. Jev je vysvětlen tím, že jemnější abrazivo (100 MESH) více reaguje na vychylování paprsku v průběhu obrábění.

Proběhlo testování využití granátu a olivínu jako použitého abraziva [29]. Ze získaných výsledků bylo poukázáno na možnost, že granát zajišťuje vyšší úběr materiálu než olivín, nicméně jak sám autor článku zmiňuje, vysvětlení takového výsledku je mnoho, jelikož nebyly použity porovnatelné velikosti abrazivních částic každého z materiálu a částice olivínu byly menší (přibližný tvar a poškození částic abraziva byly také odlišné). Drsnost byla zaznamenána vyšší pro granát než olivín. Zbylé parametry byly stejné pro oba typy materiálu.

3.3.2 Velikostní parametry trysky a usměrňovací trubice

Vliv tvaru a velikosti trysky jsou zahrnuty ve výtokovém koeficientu trysky, což je parametr pomáhající modelovat proces obrábění. Jsou v něm zahrnuty mimo jiné i ztráty způsobené třením kapaliny o stěny trysky [30]. Průměr trysky je limitován vlastnostmi čerpadla (tlak, průtok kapaliny) i nutností dodržet určité hodnoty vzhledem k velikosti abrazivních částic a průměru usměrňovací trubice. Střední výstupní rychlost vody z trysky je mimo tlaku a hustoty kapaliny definována průměrem trysky, délkou válcové části trysky a kvalitou stěn otvoru trysky. Vyrábějí se v určitých velikostních řadách od 0,008 palce (cca 0,203 mm) s postupem o velikosti 0,001 palce (cca 0,0254 mm).

Průměr usměrňovací trubice je parametr, který ovlivňuje následný průměr paprsku, jež se šíří prostředím. Limituje průtok abraziva tak, aby nedošlo k přehlcení systému abrazivem a proces obrábění materiálu mohl být efektivní. Mimo uvedené má vliv i na kvalitu obrobeného povrchu materiálu [30]. Její velikost se u obvyklých komerčních strojů pohybuje okolo 1 mm.

Délka usměrňovací trubice také ovlivňuje výslednou kvalitu obráběného povrchu materiálu. Obvyklá délka je 76 mm.

4 MODEL SOUSTRUŽENÍ POMOCÍ AWJ

4.1 Finnieho model erozivního úběru

Tento model erozivního úběru je zde uveden, vzhledem k tomu, že byl použit k odvození modelu soustružení AWJT. Finnie byl první, kdo vytvořil model erozivního úběru. Nejprve je ovšem nutné uvést, o jaký typ materiálu se jedná vzhledem k plastické deformaci. U kujných materiálů dochází při dopadu k řezu nebo přemístění částic materiálů. U křehkých materiálů dochází při dopadu částic k tvorbě trhlin, které se šíří dále do materiálu a úběr je způsoben interakcí těchto trhlin. Uvedený model se týká dopadů na kujný materiál a jeho výstupní hodnotou je minimální objem ubraného materiálu, připadající na jednu dopadající částici [31].

Model je odvozen pomocí pohybových rovnic erozivní částice, kde předpokládaný úběr je prováděn hrotem této částice. Bylo uvedeno několik předpokladů modelu. Prvním z nich je, že poměr vertikální ku horizontální síle (K) působící na erodující částici je konstantní. Předpoklad je v přibližné platnosti, pokud se geometrické nastavení procesu v průběhu děje nemění a rotace částice je zanedbatelná. Dopadající částice je tvrdší než povrch materiálu a nedochází k jejímu poškození. Poměr hloubky kontaktu částice (povrch abraziva dotýkající se povrchu materiálu) ku poměru hloubky průniku částice (ψ) je konstantní. Dále se předpokládá, že při dopadu abrazivních částic je okamžitě dosaženo napětí potřebné k plastickému toku materiálu (S). Po integraci a zavedení časové podmínky výstupu částice z materiálu autor odvodil rovnice [31]:

$$Q = \frac{mv_d^2}{T\psi K} \left(\sin(2\alpha) - \frac{6}{K} \sin^2 \alpha \right) \quad \text{pro } \tan \alpha \leq \frac{K}{6} \quad (4.1)$$

$$Q = \frac{mv_d^2}{T\psi K} \left(\frac{K \cos^2 \alpha}{6} \right) \quad \text{pro } \tan \alpha \geq \frac{K}{6} \quad (4.2)$$

V uvedených rovnicích je m hmotnost dopadající částice a v_d je dopadová rychlost částice. Pro hranaté částice abraziva nabývá velikost K hodnoty 2. Platí tedy, že zlomovým úhlem pro použití druhé rovnice objemu ubraného materiálu je $18,5^\circ$. Jedná se o úhel, při kterém již částice abraziva nevystoupí ven z materiálu. Z uvedených rovnic jsou vyvozeny rovnice popisující dopad většího množství částic na materiál (4.3 a 4.4). Tyto rovnice se již přímo týkají použití hranatých částic abraziva na kovy ($K=2$, $\psi=2$). Objem ubraného materiálu byl snížen o 50%, jelikož ne všechny dopadající částice vykazují ideální chování při úběru materiálu. Některé z nich nezabírají do materiálu vůbec.

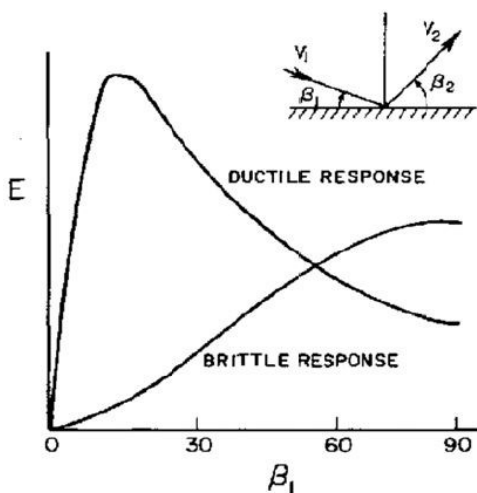
$$Q \approx \frac{Mv_d^2}{8T} \left(\sin(2\alpha) - 3 \sin^2 \alpha \right) \quad \text{pro } \alpha \leq 18,5^\circ \quad (4.3)$$

$$Q \approx \frac{Mv_d^2}{24T} \cos^2 \alpha \quad \text{pro } \alpha \geq 18,5^\circ \quad (4.4)$$

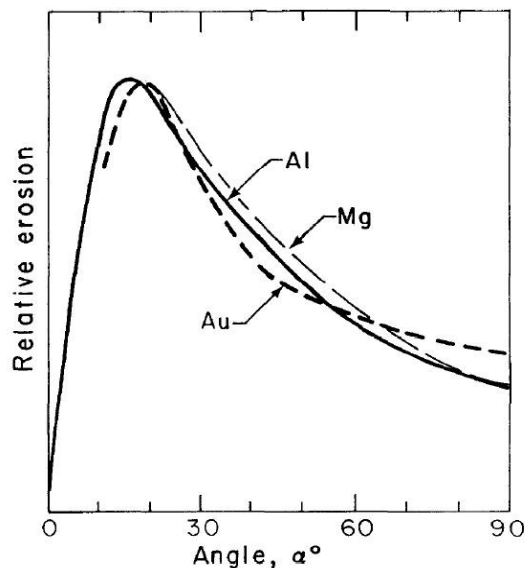
M je celková hmotnost působících částic abraziva. Veličinu T , která charakterizuje napětí v materiálu při použití daného abraziva, je zapotřebí určit experimentálně. Oproti hodnotám získaným standardními tlakovými i tahovými zkouškami, nabývá tato veličina hodnot vyšších.

Limitací Finnieho erozivního úběru je již samotný předpoklad pouze řezného úběru materiálu. Jak bylo prokázáno dále, dochází i k deformaci a s ní spojenému úběru materiálu. Při nízkých úhlech dopadu (úhel, který svírá povrch materiálu s vektorem rychlosti dopadu jednotlivých částic), je řezný úběr dominantní a model je až dodopadového úhlu asi 45° použitelný. Porovnání úběru kujných a křehkých materiálů je uvedeno na obrázku 25 (E je hmotnost ubraného materiálu vydělená celkovou hmotností dopadajících částic a β je jinak označený dopadový úhel). Nicméně ze samotné rovnice 4.4 je vidět, že při dopadovém úhlu 90° by nedocházelo k žádnému úběru materiálu. Model v tomto případě podceňuje objem ubraného materiálu a nedá se použít.

Dalším nedostatečným předpokladem může být, že model předpokládá dopady částic na hladký povrch materiálu, přičemž po několika dopadech je povrch materiálu „zdrsněn“. I přes tyto limity je možné, že v některých konkrétních případech AWJT je teoreticky možné tento model použít. Jedná se pouze o nastavení v tangenciálním módu, při velmi nízkých hloubkách záběru tak, aby byl dodržen nízký dopadový úhel paprsku. Model by měl být použitelný pro nízkouhlíkové oceli, hliník a jiné kujné materiály (porovnání chování různých kujných materiálů je na obrázku 26).



Obr. 25. Porovnání odezvy ubraného množství kujného a křehkého materiálu [32]



Obr. 26. Obdobná závislost úběru kujných materiálů na dopadovém úhlu [33]

4.2 Modely tangenciálního módu soustružení

Model založený mimo jiné na Finnieho teorii eroze uvedli Manu a Babu [28]. Jejich model začíná formováním paprsku v trysce a vyjádřením rychlosti šíření paprsku pomocí modifikované Bernoulliho rovnice, ve které je obdobně jako v rovnici 2.1 a 2.2 zahrnut ztrátový koeficient paprsku. Dále je obdobně jako v rovnici 2.3 vyjádřena pomocí zákona zachování hybnosti rychlost šíření paprsku po směšování kapaliny s abrazivem, s tím, že místo několika koeficientů je zaveden jenom jeden korekční koeficient charakterizující efektivitu procesu směšování. Následně model vyjadřuje změny parametrů v průběhu procesu podle jejich změn na jednu otočku materiálu. Takto je zaveden úhel dopadu paprsku (rovnice 4.5), hloubka záběru v materiálu (rovnice 4.6) a aktuální průměr vzorku (rovnice 4.7).

$$\alpha_k = \arccos\left(\frac{2x}{D_k}\right) \quad (4.5)$$

$$d_{rk} = \frac{Q_k}{\pi D_k d_j} \quad (4.6)$$

$$D_{k+1} = D_k - 2d_{rk} \quad (4.7)$$

Rovnice 4.5 je obdobou rovnice 3.12, kde je použito označení uvedené v této práci. Veličina α_k je dopadový úhel pro k – tou otočku materiálu, D_k je průměr vzorku na začátku k – té otočky, x je rozdíl poloměru vzorku a hloubku záběru v materiálu, d_j je průměr paprsku a Q_k je objem ubraného materiálu během k – té otočky. Velikost změny průměru vzorku při k – té otočce je vyjádřena veličinou d_{rk} . Následný průměr vzorku lze vyjádřit rovnicí 4.7.

Pro zjištění objemu ubraného materiálu je použita právě Finnieho teorie eroze. Na rozdíl od rovnic uvedených v předchozí podkapitole, kde je předpokládán ubraný objem materiálu 50% oproti ideálnímu stavu, zavádějí autoři konstantu c , která toto odlišné chování vyjadřuje, ve vztahu 4.8 a 4.9.

$$Q = \frac{cMv_d^2}{4S} (\sin 2\alpha - 3 \sin^2 \alpha) \quad \text{pro } \alpha \leq 18,5^\circ \quad (4.8)$$

$$Q = \frac{cMv_d^2}{12S} \cos^2 \alpha \quad \text{pro } \alpha \geq 18,5^\circ \quad (4.9)$$

Při daných experimentálních podmínkách je jedinou neznámou veličností S (charakterizující napětí plastického toku materiálu), kterou Finnie navrhuje získat experimentálně (pro jeden materiál a jeden typ abraziva). Dle autorů článku však Hashish uvádí, že hodnota S odpovídá přibližně hodnotě $E_0/14$, přičemž E_0 je hodnota modulu pružnosti v tahu daného materiálu. Autoři článku tedy nejprve provedli testovací experiment, kdy pomocí vztahů 4.8 a 4.9 a známých hodnot průtoku abraziva, dopadového úhlu, rychlosti dopadajících částic a získaného objemu ubraného materiálu tento parametr určili.

Aby bylo možné určit počet interakcí paprsku s materiálem, vyjádřili autoři pomocí postupové rychlosti paprsku v axiálním směru vzorku počet průchodu paprsku každou infinitezimálně malou částí povrchu materiálu vztahem 4.10.

$$N = f \frac{D}{v_p} \quad (4.10)$$

f je frekvence otáčení za minutu, v_p je postupová rychlost paprsku a D je průměr paprsku. Celý válcový materiál je tedy vystaven paprsku N -krát.

Autoři v experimentální části nejprve tedy určili hodnotu napětí plastického toku S a následně provedli samotné testování modelu (obráběným materiálem byl vzorek z hliníku). Aby bylo zamezeno více průchodům paprsku jedním místem materiálu a tedy i možným odlišnostem v dopadovém úhlu, došlo nejprve k seřízení postupové rychlosti s frekvencí otáčení tak, aby za jednu otočku paprsek urazil vzdálenost větší než je průměr paprsku. Výsledný objem ubraného materiálu je potom určen pomocí hmotnosti tohoto materiálu před a po obrábění a jeho hustoty. Za koeficient c autoři dosadili hodnotu 0,5. Při použití granátu jako abraziva byla pro průměr usměrňovací trubice 0,76 mm použita hodnota napětí plastického toku 1000 MPa.

Z provedeného testování byly zjištěny odchylky (-1,7 mm až 1,3 mm, v průměru -0,2 mm) od předpovězeného průměru vzorku. Výsledky experimentu jsou ukázány na obrázku 23 v předchozí kapitole. Výsledný průměr oproti teoretickým hodnotám může být zkreslen zanedbáním divergence paprsku v prostředí. Výhodou uvedeného modelu je to, že v sobě zahrnuje proměnný úhel dopadu paprsku na materiál.

Model kde byla k množství ubraného materiálu jednou částicí použita počítačová simulace pomocí metody konečných prvků prezentoval Li a kolektiv [19]. Ve své práci simuloval dopad sférické částice abraziva na materiál. Oproti předchozímu modelu nebyla použita Finnieho teorie eroze. Model je zaměřen na experimenty, které byly provedeny na vzorcích keramiky z oxidu hlinitého, což je materiál projevující se křehkou odezvou na působící sílu.

I přesto byly použity vztahy definované v předchozím modelu (4.6, 4.7 a 4.10), přičemž objem ubraný během jedné otočky byl vyjádřen pomocí vztahu 4.11.

$$Q_n = c \dot{m}_a Q \frac{60}{f} \quad (4.11)$$

Q_n je objem ubraného materiálu během jedné otočky, \dot{m}_a je průtok abraziva Q je objem ubraného materiálu připadající na jednu částici, f je frekvence otáčení materiálu a c je koeficient modifikující ideální úběr materiálu jednou částicí. V metodě konečných prvků byl použit JH-2 konstitutivní model (určený pro keramické materiály), přičemž pro jeho využití bylo zapotřebí znát několik materiálových parametrů, ze kterých se počítalo napětí materiálu, počáteční pevnost materiálu a jiné. Byl simulován dopad částic o různých rychlostech a pod odlišnými dopadovými úhly. Veličinou získanou tímto modelem je celková hloubka průniku paprsku v materiálu. Z obrázku 13 uvedeného v předchozí kapitole lze vidět, že v případě tlaku došlo k velmi dobré shodě předpovězených hodnot s experimentálně naměřených. Závislost hloubky penetrace na dopadovém úhlu nebo rychlosti povrchu materiálu, vykazuje o něco větší odchylky [19].

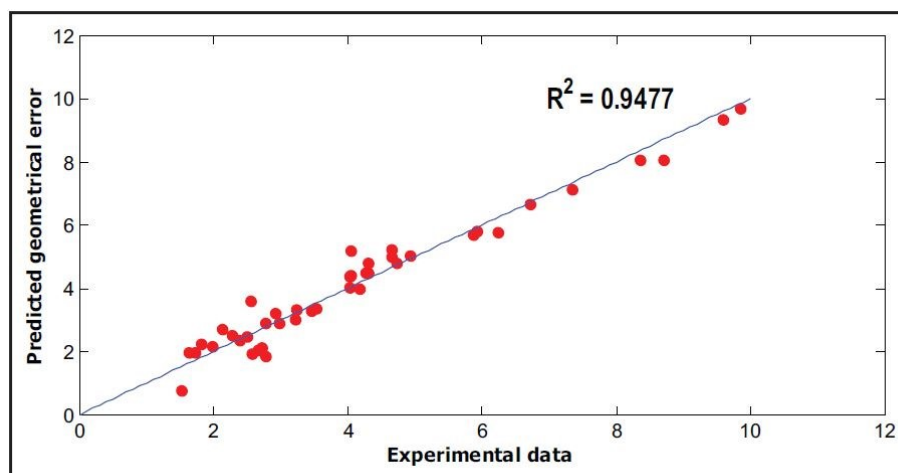
Statistickou analýzu pomocí metody ANOVA a RSM (Response surface methodology) provedl Zohour a kolektiv [34]. Ve svém modelu testovali různé parametry procesu a jejich vliv na geometrickou chybu výsledného vzorku (rozdíl požadovaného a obrobeného průměru materiálu, podělený požadovaným průměrem) vyjádřenou v procentech. Model lze charakterizovat následující závislostí.

$$GE = g(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) + \varepsilon \quad (4.12)$$

Kde x_1 až x_5 je tlak vody, postupová rychlost, frekvence otáčení, průtok abraziva a hloubka řezu v materiálu a ε je chybový člen závislosti. Metoda RSM umožňuje aproximovat neznámou funkci f a vyjádřit ji vhodným polynomem, přičemž v tomto případě byl zvolen polynomiální rozvoj druhého řádu (4.13).

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j=2}^k \sum \beta_{ij} x_i x_j \quad (4.13)$$

Jednotlivé koeficienty jsou získány různými regresními metodami a výzkum významných proměnných byl proveden pomocí ANOVY. Výsledkem modelu je rozsáhlá rovnice působení jednotlivých parametrů, která obsahuje dohromady součet jednadvaceti členů, v různých mocninách nebo vzájemných součinech. Přesnost modelu lze vidět na obrázku 27.



Obr. 27. Predikované a naměřené hodnoty geometrické chyby [34]

4.3 Modely radiálního módu soustružení

Li a kolektiv ve svém experimentu se soustružením vysokopevnostních ocelí zkoušeli modelovat hloubku průniku v materiálu [21]. V experimentální sekci provedli testování postupové rychlosti paprsku, povrchové rychlosti vzorku, průtoku abraziva, tlaku vody a náklonu usměrňovací trubice v radiálním směru. Autoři zavádějí tři předpoklady modelu: abrazivní částice jsou rozprostřeny stejně podél celého průřezu abrazivního vodního paprsku, změny rychlosti toku paprsku jsou zanedbány a nárůst vzdálenosti ústí trubice od povrchu materiálu v průběhu procesu je ignorován. Jednoduchým geometrickým vztahem je vyjádřena rychlost úběru materiálu (4.14).

$$MRR = \pi v_p (R_i^2 - (R_i - d_r)^2) = \pi v_p (2R_i d_r - d_r^2) \quad (4.14)$$

v_p je postupová rychlost, R_i je původní průměr vzorku a d_r je hloubka průniku v materiálu. Rychlost úběru materiálu vyjádřili také pomocí množství ubraného materiálu na jednu otočku (rovnice 4.15).

$$MRR = NQ_n \quad (4.15)$$

Veličinu Q_n , která vyjadřuje objem ubraného materiálu na jednu otočku lze vyjádřit pomocí objemu ubraného materiálu připadající na jednu dopadající částici abraziva Q (rovnice 4.16).

$$Q_n = \frac{m_a}{Nm} Q \quad (4.16)$$

Z porovnání rovnice 4.14 a 4.16 plyne:

$$MRR = \frac{m_a}{Nm} Q = \pi v_p (2R_i d_r - d_r^2) \quad (4.17)$$

K určení parametru Q autoři využili dimenzionální analýzu. Jako podstatné parametry pro určení úběru materiálu jednou částicí autoři určili hmotnost abrazivní částice (m), hustotu dopadajících částic (ρ_a), dopadovou rychlost (v_d) a dopadový úhel částic (α). Jako další podstatné materiálové

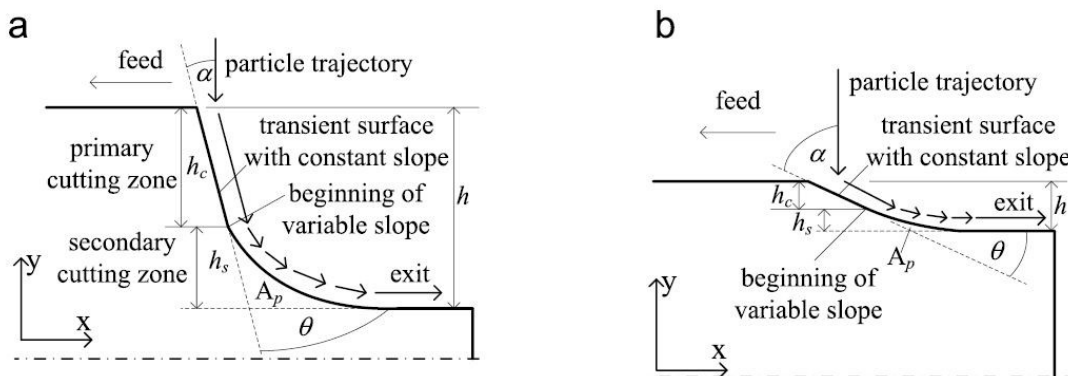
parametry byly zvoleny tvrdosti obráběného materiálu (H) a dopadající částice (H_a). Autoři článku hledali funkci g vyjadřující závislost ubraného objemu částicí na jednotlivých parametrech (rovnice 4.18).

$$Q = g(m, \rho_a, \alpha, v_d, H_a, HV) \quad (4.18)$$

Jako tři základní veličiny pomocí nichž lze vyjádřit všechny zbylé neznámé ve vztahu byly zvoleny délka, hmotnost a čas. Dále bylo zvoleno několik bezrozměrných veličin, jejichž počet je dán rozdílem celkových proměnných a uvedených základních veličin. Ve čtvrté bezdimenzionální proměnné byla jedna z veličin objem ubraného materiálu jednou částicí. Z dimenzionální analýzy a statistického zpracování vzešel vztah 4.19.

$$\frac{QHV}{mv_d^2} = I\alpha^{i_1} \left(\frac{H_a}{HV} \right)^{i_2} \left(\frac{\rho_a v_d^2}{HV} \right)^{i_3} \quad (4.19)$$

Kde konstanty I , i_1 , i_2 a i_3 je zapotřebí určit experimentálně. Jelikož se úhel dopadu paprsku mění v průběhu samotného řezu, provedli autoři vizualizační experiment, přičemž uvedli obrázek proměnného dopadového úhlu spolu s definicí řezné a deformační zóny v materiálu (obr. 28). Je zajímavé povšimnout si definice neubraného objemu materiálu (A_p) a s ním souvisejícího úhlu Θ . Obdobně jako byla vyjádřena rovnice 4.19, byl vyjádřen i úhel dopadu pomocí dimenzionální analýzy, Bernoulliho rovnice a zákona zachování hybnosti soustavy částice abraziva, částice kapaliny ve směšovací komoře.



Obr. 28. Trajektorie paprsku při radiálním soustružení a zavedené veličiny [21]

Důsledkem obou dimenzionálních analýz a doplňujících vztahů je vztah pro hloubku průniku 4.20 [21].

$$h = R_i - \left(R_i^2 - A_1 \frac{p_0^{2.04477} \rho_a^{1.04477} m_a^{A_2} \alpha^{A_3} m^{A_4} d_j^{A_5}}{\pi v_p^{1.1737} \rho_v^{2.04477} v_o^{0.054986} HV^{A_6}} \right)^{1/2} \quad (4.20)$$

Konstanty A_1 až A_6 uvedené v modelu byly zjištěny pomocí regresních vztahů, které byly určeny z experimentálních hodnot. Obráběným materiálem byly ocelové válce EN 10250 o pevnosti v tahu 850 MPa. Jako abrazivo byl použit granát 80 MESH.

V další studii modelovali pro stejný experiment se stejným materiálem i abrazivem autoři drsnost povrchu po soustružení pomocí AWJ [35]. Model byl odvozen stejným způsobem, tedy dimenzionální analýzou drsnosti povrchu. V této studii autoři mimo již uvedené označili jako důležité parametry i velikost abrazivních částic, vliv tvaru abrazivních částic a efektivitu transferu hybnosti z vodního paprsku na částice abraziva. Drsnost obrobeného materiálu stanovili autoři pomocí následující rovnice:

$$R_a = C_R \alpha^{l_1} p_0^{l_2} \left(\frac{m_a v_p}{p_0} \right)^{l_3} \left(\frac{v_p}{v_o} \right)^{l_4} \left(\frac{m_a}{v_p} \right)^{l_5} \quad (4.21)$$

Z regresní analýzy byly získány dané koeficienty a pro drsnost tedy platí [35]:

$$R_a = 0.00258 \alpha^{0.344} p_0^{1.134} m_a^{-0.263} v_p^{-0.488} v_o^{-0.189} \quad (4.22)$$

Stejní autoři testovali soustružení AWJT na karbonovými vlákny vyztužených kompozitech [20]. Při obrábění pozorovali zcela odlišné chování úběru materiálu než v případě vysoko pevnostních ocelí a keramiky z oxidu hlinitého. Toto chování se dá shrnout do rovnice popisující rychlost úběru materiálu (4.23).

$$MRR = \pi v_p [R_i^2 - (R_i - h)^2] = \pi v_p h (2R_i - h) \approx 2R_i \pi v_p h \quad (4.23)$$

Pokud je průnik paprsku do materiálu mnohem nižší než původní průměr vzorku, navrhuje autoři zanedbat jeho druhou mocninu v uvedené rovnici. Odlišný úběr materiálu autoři chtějí simulovat pomocí následujícího předpokladu [20]:

$$h \propto \frac{1}{v_p^e} \quad (4.24)$$

kde pokud je koeficient e vyšší než 1, pak dochází k poklesu rychlosti úběru materiálu se zvyšující se postupovou rychlostí. Pokud je koeficient e menší než 1, je trend opačný.

4.4 Hodnocení uvedených modelů, předpoklady k experimentální části

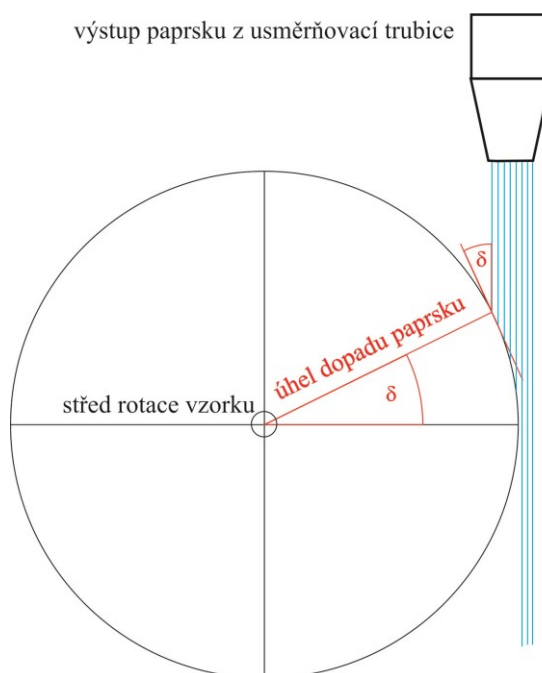
I když všechny modely soustružení, uvedené v této kapitole, se zdají být dostatečně přesné, jejich limitací je použitelnost v jiných experimentech. V případě statistických modelů je jejich další použití limitováno odlišnými podmínkami experimentu, kde tento model pozbývá platnosti. I přesto, ale statistické modely udávají alespoň nějakou informaci o vlivu parametrů procesu.

V případě analytických modelů je situace odlišná, nicméně konstanty uvedené v těchto modelech jsou definovány na konkrétní materiál a podmínky. Konstantní parametry uvedené v modelech jsou převzaty z jiné literatury, přičemž chybí informace, jak autoři postupovali při jejich určení. Modely mají sice fyzikální základ, ale uvedené rovnice nezapočítávají důležité vlivy. Může tedy dojít ke zkreslení výsledků. Tuto nepřesnost lze kompenzovat koeficienty, které jsou ovšem stejně definované pouze pro určité podmínky.

Z výše uvedených důvodů, nelze zcela převzít uvedené modely, nicméně jednoduché geometrické vztahy, které byly uvedeny, použít lze. Snahou všech těchto modelů je najít vztah, kterým bychom

byli schopni vyjádřit ubraný objem materiálu a mohli tedy efektivně soustružit vzorky na požadovaný výsledný průměr. Druhotným cílem je ohodnocení kvality povrchu a její modelování.

Nejpřesnějším způsobem je určení objemu materiálu ubraného jednou částicí dopadajícího abraziva v závislosti na podmínkách a parametrech procesu. Problémem takového přístupu může být nedostatečná znalost všech materiálových a procesních parametrů. V literatuře jsou uvedeny možnosti vztažení ubraného objemu na jednu otočku materiálu. Abychom mohli zvolit správné vyjádření ubíraného objemu, je vhodné si samotné působení paprsku načrtnout (obr. 29).



Obr. 29. Znázornění dopadu AWJ na materiál

Z obrázku je patrné, že dopadový úhel paprsku se v celém jeho průřezu liší. Na krajích vzorku dosahuje hodnot okolo 0° , přičemž čím dál více do středu materiálu se úhel dopadu zvyšuje. Například při soustružení válce o průměru 20 mm, kde bychom použili hloubku záběru 1 mm, se bude lišit dopadový úhel v rozmezí $0^\circ - 26^\circ$ (není započítána divergence svazku). Vztah 2.5 se sice týká interakce čistého vodního paprsku s materiálem, nicméně i z tohoto vztahu lze usuzovat, že s narůstajícím úhlem dopadu klesá efektivita procesu a množství ubraného materiálu. Z Finnieho teorie eroze navíc vyplývá, že při překročení úhlu dopadu $18,5^\circ$ dochází s narůstajícím úhlem ke snížení úběru materiálu efektivnějším řezným způsobem (viz rovnice 4.8 a 4.9). Na druhou stranu dochází ke zvýšení ubraného materiálu deformačním způsobem. Je tedy názorně vidět, že objem ubraného materiálu se bude lišit při působení různých částí paprsku. Rozpětí úhlu dopadu souvisí s průměrem vzorku, kde při velkých průměrech nebude tento rozdíl příliš významný.

Dalším faktorem, který je nutno brát v potaz je i zmenšení průměru vzorku po každé otočce, na což navazuje i menší změna úhlů dopadu. Z uvedených informací vyplývá, že pro analýzu úběru materiálu by bylo výhodné rozdělit podle úhlu dopadu paprsek na části a následně vyjádřit úběr materiálu každou touto částí v průběhu jedné otočky vzorku. Součtem dílčích částí bychom tedy získali celkově ubraný objem materiálu (rovnice 4.25) a výsledný průměr vzorku.

$$Q_n = N_1 Q_{1n} + N_2 Q_{2n} + \dots N_k Q_{kn} \quad (4.25)$$

N_k reprezentuje počet dopadajících částic abraziva v k-té části paprsku a Q_{kn} je objem ubraný k-tou částí paprsku při n-té otočce. Ve vztahu 4.25 je nutno počítat pouze s částmi paprsku, které přímo působí na materiál. Velikost dopadajících abrazivních částí pro jednotlivé části paprsku bude odlišná stejně jako v průřezu AWJ.

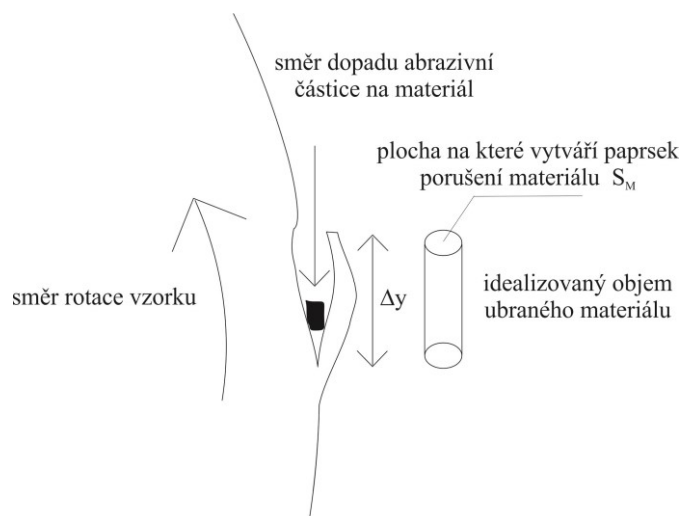
Jednou z možností, jak vyjádřit úběr materiálu každou jednou částí paprsku, je určit objem ubraného materiálu jednou částicí abraziva následně vynásobený počtem dopadajících částic. Úběr materiálu jednou částicí abraziva lze obecně přibližně vyjádřit pomocí zákona zachování energie soustavy částice abraziva a částice materiálu (rovnice 4.26).

$$E_{kD} = E_{kp} + E_{km} + E_r \quad (4.26)$$

Kde E_{kD} je dopadová kinetická energie paprsku/abraziva, E_{kp} je zbytková kinetická energie paprsku vycházejícího z materiálu, E_{km} je kinetická energie materiálu po procesu řezu a E_r je práce vykonaná vodním paprskem při rozrušení části materiálu. Do zákona zachování energie nejsou zahrnuty tepelné ztráty v průběhu procesu. Při nízkých hloubkách záběru do materiálu, kde dochází hlavně k řeznému úběru materiálu a mechanismem úběru je především překročení meze pevnosti ve smyku lze vyjádřit E_r pomocí vztahu 4.27.

$$E_r = \sigma_M S_M \Delta y \quad (4.27)$$

Tento vztah je limitován nízkou hloubkou záběru paprsku do materiálu. Kde σ_M je velikost napětí bránící průchodu paprsku/abraziva do materiálu, S_M je plocha na které vytváří paprsek porušení materiálu a Δy je délka, na které dochází k porušování materiálu. Předpokladem vzorce je, že objem ubraného materiálu je přibližně roven součinu délky porušování materiálu a plochy, na které vytváří paprsek porušení materiálu (obr. 30). Dalším předpokladem je konstantní hodnota napětí bránící průchodu paprsku do materiálu. Plocha porušení materiálu se bere jako konstantní pro každou částici.



Obr. 30. Znárodnění úběru materiálu z jeho kraje

Díky tomuto předpokladu jsme schopni vyjádřit objem ubraného materiálu podle vztahu 4.28.

$$Q = \frac{1}{2} \frac{m(v_d^2 - v_v^2) - m_m v_m^2}{\sigma_M} \quad (4.28)$$

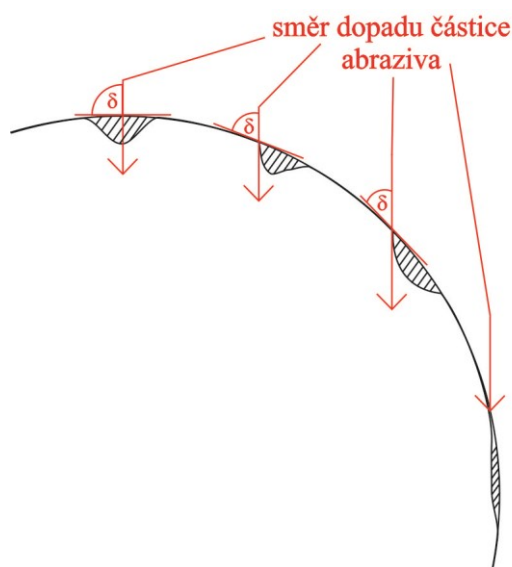
Kde m je hmotnost dopadající abrazivní částice, v_v je rychlost částice abraziva po procesu obrobení materiálu, m_m je hmotnost ubraného materiálu částicí abraziva a v_m je rychlost ubraného materiálu. Jelikož je materiál otáčen podél své osy, je zapotřebí zahrnout rotaci zařízení do uvedeného vztahu. Je evidentní, že rychlost povrchu materiálu má opačný směr při nízkých hloubkách záběru než dopadová rychlost abrazivních částic, je proto možné zavést předpoklad, kde zavedeme relativní dopadovou rychlost jako součet skutečné dopadové rychlosti a rychlosti povrchu materiálu ve směru rovnoběžném se směrem dopadajícího paprsku. Bude tedy platit vztah:

$$v_r = v_d + v_o = v_d + 2\pi Rf \cos \delta \quad (4.29)$$

Po nahrazení dopadové rychlosti částice abraziva uvedenou rychlostí získáme pro objem ubraného abraziva v malých hloubkách záběru vztah 4.30.

$$Q = \frac{1}{2} \frac{m([v_d + 2\pi Rf \cos \delta]^2 - v_v^2) - m_m v_m^2}{\sigma_M} \quad (4.30)$$

V obecném případě (různé hloubky záběru a dopadový úhel) předpokládám úběr materiálu jako součet řezného a deformačního úběru, kde již určitě nelze aproximovat práci vykonanou k rozrušení paprsku jako práci vykonanou při přesunu abrazivní částice po lineární trajektorii. Na základě zakřivování trajektorie paprsku v materiálu v důsledku snížení energie paprsku (příp. částic) při řezu plochých vzorků, usuzuji, že odlišnosti trajektorie paprsku v případě kruhového vzorku budou vypadat přibližně jako na obrázku 31.



Obr. 31. Vliv dopadového úhlu paprsku na tvar ubíraného objemu materiálu (se zvětšeným měřítkem)

V obecném případě je obtížnější analyticky z fyzikálních rovnic určit velikost ubraného objemu materiálu připadající na jednu částici abraziva. Abychom mohli vyjádřit ubraný objem, potřebujeme znát hloubku průniku paprsku do materiálu. Nicméně jenom tato informace nemusí zcela stačit. Hloubku průniku paprsku do materiálu lze obecně stanovit například pomocí rovnováhy sil působících na část paprsku ve směru stejném jako dopadající paprsek. K přesné analýze procesu by bylo potřeba definovat a určit mnoho dalších parametrů a koeficientů pomocí dalších doplňkových měření.

Postupová rychlost ovlivňuje dobu působení paprsku na materiál a vyskytuje se ve vztahu 4.10. S klesající postupovou rychlostí se zvyšuje počet otáček materiálu, během nichž působí paprsek na jednotlivé části materiálu. V sumačním vztahu 4.25 zároveň budou přibývat další členy a lze očekávat zvýšení objemu ubraného materiálu v případech, kdy paprsek ještě neubral dostatečné množství materiálu dané jeho relativní pozicí vůči materiálu.

Stanovení přesného modelu není náplní této práce, smyslem uvedených vztahů je pouze nastínění možných souvislostí jednotlivých veličin a porovnání s experimentálními hodnotami.

Testované předpoklady a odhady procesu AWJT:

- Ubraný objem nesouvisí zásadně s počtem otáček a tedy počtem průchodu paprsku po jednotlivých částech povrchu materiálu. Snížení objemu ubraného materiálu způsobeného zvýšením postupové rychlosti, nelze kompenzovat navýšením frekvence otáčení.
- Zvyšující se frekvence otáčení má do jisté limitní hodnoty pozitivní vliv na rychlost úběru materiálu.
- Se zvyšujícími se otáčkami se bude zvyšovat drsnost výsledného povrchu
- Úhel dopadu (hloubka záběru do materiálu) ovlivňuje významně objem ubraného materiálu, se zvyšujícím se úhlem dopadu paprsku na materiál klesá rychlost úběru materiálu.
- Kruhovitost měřených vzorků s kruhovým průřezem by měla splňovat požadavky strojních součástí.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Experimentální uspořádání

Všechny experimenty byly provedeny na pracovišti Katedry fyziky VŠB-TUO Ostrava v Laboratoři kapalinového paprsku. Byl použit x-y stůl PTV WJ1020-1Z-EKO (obr. 32) a čerpadlo HSQ 5X s parametry, které jsou uvedeny v tabulce 1.

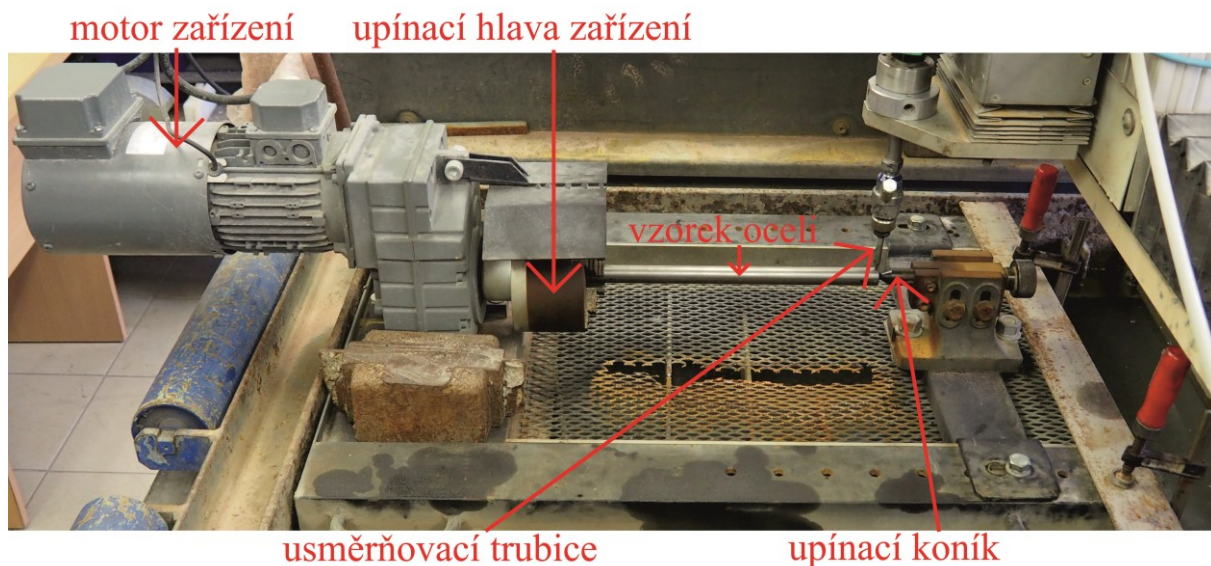
Tabulka 1 Parametry zařízení AWJ pracoviště kapalinového paprsku

maximální tlak vody	400	MPa
experimentální tlak vody	380	MPa
průměr vodní trysky	0,25	mm
průměr usměrňovací trubice	0,76	mm
délka usměrňovací trubice	76	mm

Pro soustružení bylo použito doplňkové zařízení s motorem Lenze, které bylo konstruované a dodané Fakultou výrobních technologií se sídlem v Prešově, která je součástí TU Košice. Umožňuje rotaci vzorku upevněného z obou stran s frekvencí otáčení do 1000 ot./min, s nastavitelným směrem otáčení materiálu. Uchycení materiálu je zajištěno čtyřčelistovou hlavou na jedné straně a koníkem na straně druhé (obr. 33).



Obr. 32. Laboratoř s abrazivním vodním paprskem a experimentální aparaturou



Obr. 33. Zařízení pro rotaci materiálu s popisky

Jako testovaný materiál byly použity ocelové tyče s různým průřezem (kruhový, čtvercový a šestiúhelníkový). Jednalo se o ocel obvyklých jakostí, taženou za studena ČSN 11 375 v případě kruhového a čtvercového průřezu (vlastnosti v tabulce 2) a automatovou ocel ČSN 11 109 v případě šestiúhelníkového průřezu materiálu (vlastnosti v tabulce 3). Průměr vzorků s kruhovým průřezem byl 20 mm, délka hrany vzorku se čtvercovým průřezem 18 mm a šestiúhelník o průměru kružnice vepsané 19 mm.

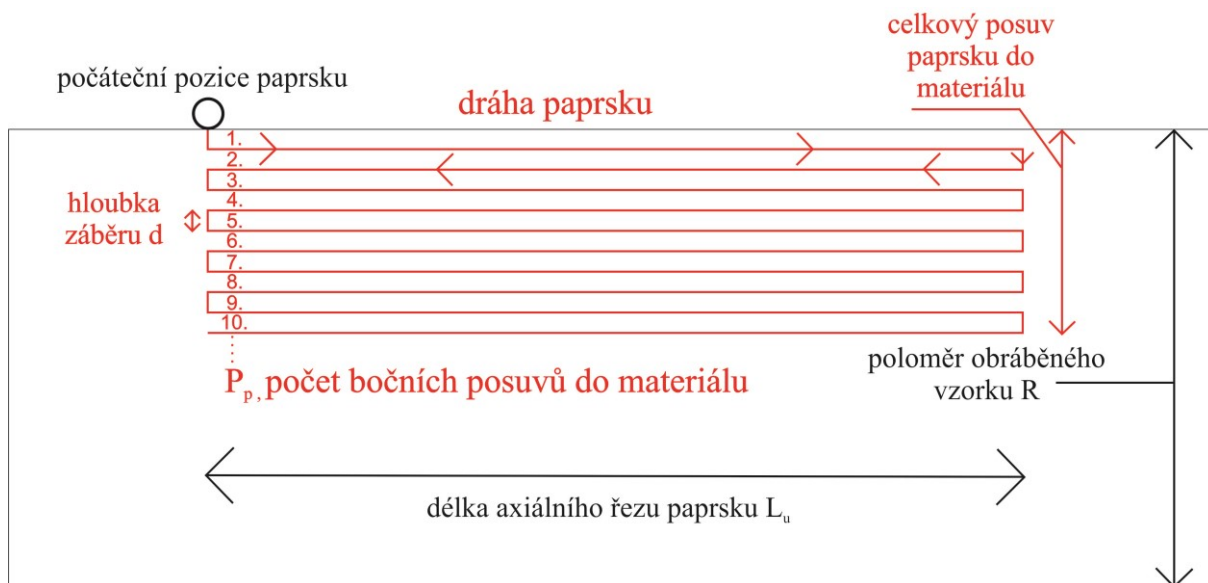
Tabulka 2 Vlastnosti oceli ČSN 11 375

pevnost v tahu R_m (MPa)	400
mez kluzu (MPa)	260
modul pružnosti v tahu (GPa)	207
Brinellova tvrdost	130

Tabulka 3 Vlastnosti oceli ČSN 11 109

pevnost v tahu R_m (MPa)	360
mez kluzu (MPa)	215
modul pružnosti v tahu (GPa)	210
Brinellova tvrdost	cca 432

Pro všechny experimenty byl zvolen víceprůchodový tangenciální mód soustružení paprskem, kde bychom dle uvedené literatury mohli lépe předpovědět výsledný průměr vzorku a případně zhodnotit shodu experimentu s analytickými modely soustružení (v případě radiálního módu nebyly nalezeny jiné než statistické modely, které srovnávat se mnou provedenými experimenty nemá příliš smysl). Vzorky byly soustruženy postupným úběrem materiálu ve vrstvách (obr. 34).



Obr. 34. CNC program pro soustružení a zároveň pohled shora na trajektorii paprsku

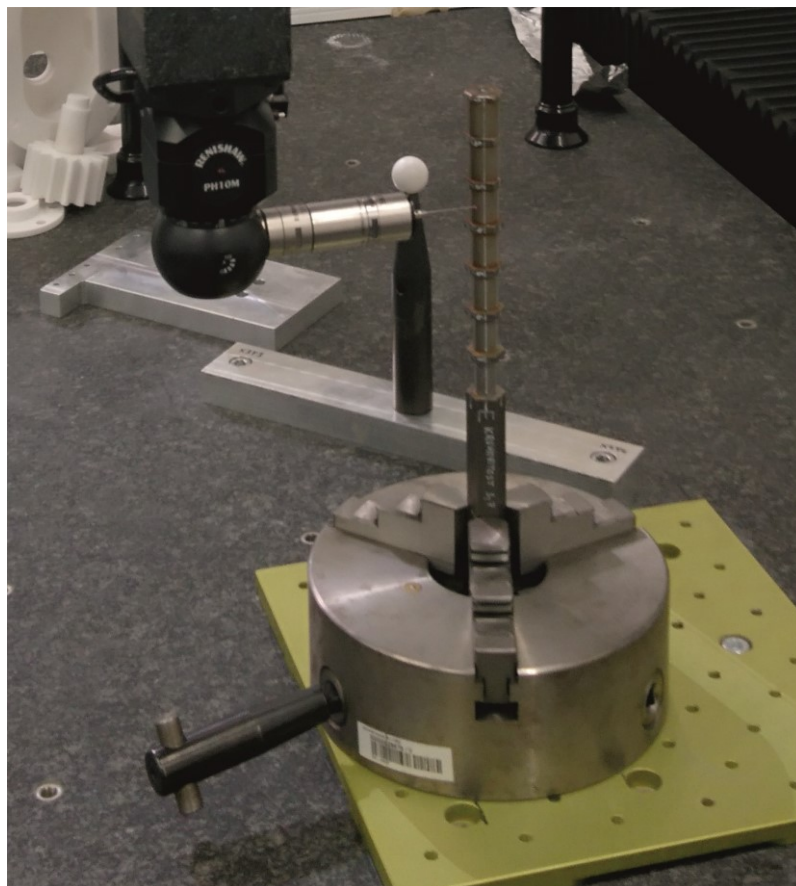
Jako podstatné parametry procesu, které byly dále testovány, byly zvoleny: postupová rychlost paprsku, frekvence otáčení materiálu, hloubka záběru v materiálu na jeden posuv paprsku, počet bočních posuvů paprsku do materiálu. Kromě uvedených parametrů byl testován také vliv tvaru průřezu vzorku.

Výstupní hodnotou experimentu byly naměřené průměry vzorku. K měření bylo použito digitální posuvné měřidlo značky Lobster s přesností na 0,01 mm. Nejistotu takového měření není jednoduché vyjádřit, protože neznámé celou spoustu parametrů ovlivňujících měření. Jedná se například o vliv nehomogenit materiálu, nepřesnosti způsobené upevněním vzorku do čelistí soustruhu, nedostatečné vycentrování vzorku a jiné. Z tohoto důvodu jsem zvolil jako nejistotu měření $\pm 5\%$ z průměru naměřených hodnot. Pro srovnání vlivu postupové rychlosti a frekvence otáčení byla měřena drsnost a kruhovitost vzorků. Měření kruhovitosti bylo pro porovnání s kruhovým průřezem provedeno i na vzorcích se čtvercovým a šestiúhelníkovým průřezem.

Tolerance kruhovitosti se používá ve strojnictví, kde měřený kruhový profil musí ležet mezi dvěma soustřednými kružnicemi. Rozdíl poloměrů těchto kružnic je brán jako tolerance kruhovitosti. Kruhovitost vzorku byla měřena na přístroji WENZEL LH 65 X3M PREMIUM s měřícím dotykem 1001 (obr. 35). Šlo o nespojité měření povrchu vzorku, kde pro každé měření přístroj zaznamenal 11 bodů na povrchu vzorku podél celé kružnice. Měření vyhodnocuje software Metrosoft QUARTIZ R6, který zaznamenává přesné polohy snímacího doteku (část měřící hlavičky přístroje). Z těchto poloh je následně vytvořen profil části a vypočteny odchylky kruhovitosti.

Byla použita Gaussova metoda vyhodnocení. Metoda spočívá v určení středové kružnice, kde součet čtverců odchylek od zadaného profilu je nejmenší. Výstupní hodnotou měření jsou vykreslené body „kružnice“ a průměrná hodnota odchylky od středové kružnice [36].

Dále bylo u některých částí provedeno snímání výsledného povrchu vzorku a vyjádřena drsnost povrchu. Snímání bylo provedeno pomocí optického přístroje Alicona Infinite Focus. Vyhodnocujícími parametry byly největší výška profilu Rz a střední aritmetická úchylka profilu Ra.



Obr. 35. Nastavení měření kruhovitosti vzorku

5.2 Vliv postupové rychlosti a frekvence otáčení na výsledný průměr

5.2.1 Měření na vzorku s kruhovým průřezem

Experiment si kladl za cíl osvětlit vliv obou parametrů na objem ubraného materiálu a kvalitu výsledného povrchu. K experimentu byla použita tyč kruhového průřezu o průměru 20 mm. Směr otáčení vzorku byl zvolen proti působení paprsku, jelikož předpokládám vyšší rychlost úběru materiálu a s tím související efektivitu procesu. Parametry procesu jsou uvedeny v tabulce 3 a 4.

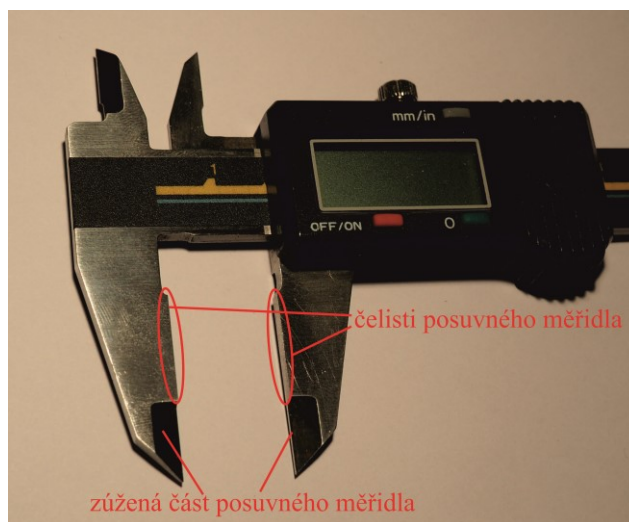
Tabulka 4 Parametry experimentu s proměnnou rychlostí a frekvencí otáčení

tlak vody	380	MPa
průtok abraziva	250	g/min
velikost abraziva	80	MESH
typ abraziva	australský granát	
hloubka záběru	0,5	mm
počet bočních posuvů do materiálu	9	
délka axiálního řezu paprsku	20	mm
postupová rychlost	10, 20, 40, 50	mm/min
frekvence otáčení	250, 500, 1000	ot./min

Pro každou frekvenci otáčení jsem otestoval všechny uvedené rychlosti posuvu paprsku (dohromady tedy 12 testů). Zvolil jsem devět bočních posuvů do materiálu, takže pokud bychom odhadovali množství ubraného materiálu pouze podle relativní pozice usměrňovací trubice a vzorku materiálu, měl by být výsledný ideální průměr vzorku 11 mm. Vyšší počet posuvů do materiálu by měl snížit vliv možné nepřesnosti, která má příčinu v nepřesném nastavení výchozí pozice paprsku. Dalším důvodem pro volbu vyššího počtu bočních posuvů do materiálu je, že se efekt spojený se změnou testovaných veličin projeví výrazněji. Jelikož jsem chtěl, aby výsledný průměr odpovídal co nejvíce požadovanému, zvolil jsem hloubku záběru pouze 0,5 mm (předpokládal jsem, že s hloubkou záběru nižší než je průměr paprsku bude pravděpodobnější obrobek na požadovaný tvar).

Na začátku každého testu byl paprsek umístěn nad střed v ose obráběného materiálu ve výšce 2 mm nad povrchem (viz obrázek 33). Poté byl posunut v radiálním směru o přibližně poloměr vzorku ke kraji tak, aby při spuštění paprsku pouze s čistou vodou nedošlo ke kontaktu paprsku a materiálu. Následně byl spuštěn AWJ a CNC program s jednoduchou lineární trajektorií (obr. 34). Délka řezu v axiálním směru vzorku byla 2 cm. Po skončení programu byl povrch materiálu ošetřen, aby nedošlo ke korozi. Následně došlo k proměření průměru vzorku posuvným měřidlem dvacetkrát na dvou místech každého řezu. Tyto místa byla zvolena tak, aby byla vzájemně úhlově posunuta o 90°.

Prvních deset měření bylo provedeno úzkou částí se sraženou hranou na konci posuvky, přičemž druhých deset bylo změřeno čelistí o něco blíže noniové stupnici (oba způsoby měření jsou názorně zobrazeny na obrázku 36). Důvodem pro tento způsob měření je, že při vyšších postupových rychlostech jsou patrné na povrchu striace a odlišnosti v průměru měřeném oběma způsoby mohou mít vypovídací hodnotu o výsledné kvalitě povrchu. Jako výsledný průměr vzorku byl brán průměr hodnot naměřených oběma způsoby. Pro srovnání s ideálním průměrem daným výslednou pozicí usměrňovací trubice je tento údaj vhodnější než průměr naměřený pouze jedním z uvedených způsobů.



Obr. 36. Různé části posuvného měřidla použité při měření

V počáteční pozici byla vzdálenost usměrňovací trubice nad povrchem materiálu 12 mm. S paprskem postupujícím směrem do materiálu se však tato vzdálenost postupně snižovala. Úhel dopadu se během několika prvních otáček pohybuje v rozmezí od 0° do 18° na kraji paprsku. Průměr paprsku, který je spojován se vzdáleností od usměrňovací trubice byl brán jako 1 mm. Počet průchodů

paprsku lze tedy vyjádřit pro jednotlivé postupové rychlosti a frekvenci otáčení pomocí vztahu 3.11. Počet průchodů paprsku pro každou jednotlivou část materiálu je vyjádřen v tabulce 5.

Tabulka 5 Počet průchodů v souvislosti s proměnnými veličinami

frekvence otáčení (ot./min)	rychlost posuvu (mm/min)			
	10	20	40	50
250	25	12,5	6,25	5
500	50	25	12,5	10
1000	100	50	25	20

Výsledný průměr vzorku je zaznamenán v tabulce 6.

Tabulka 6 Finální průměry vzorku v mm (1 experiment)

frekvence otáčení (ot./min)	rychlost posuvu (mm/min)			
	10	20	40	50
250	11,77 ± 0,59	12,11 ± 0,61	12,70 ± 0,63	13,33 ± 0,67
500	11,98 ± 0,60	12,20 ± 0,61	12,82 ± 0,64	13,48 ± 0,67
1000	11,80 ± 0,60	12,40 ± 0,62	12,82 ± 0,64	13,61 ± 0,68

Dále byl pomocí jednoduchého geometrického vztahu 5.1 vypočítán objem ubraného materiálu při posuvu o délku rovnou průměru paprsku (1 mm).

$$Q_c = \pi D(R_p^2 - R_k^2) \quad (5.1)$$

Objem ubraného materiálu je shrnut v tabulce 7.

Tabulka 7 Objem ubraného materiálu v mm³ připadající na délku posuvu rovnou průměru paprsku

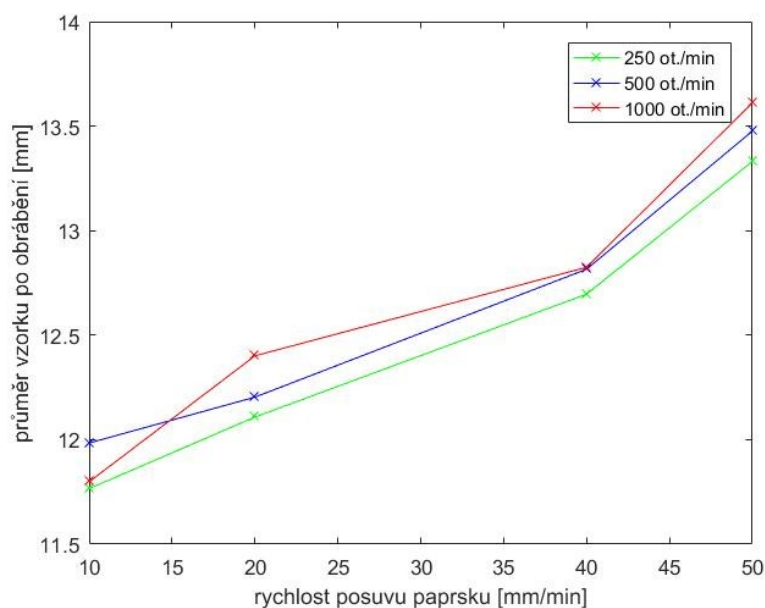
frekvence otáčení (ot./min)	rychlost posuvu (mm/min)			
	10	20	40	50
250	205,43	199,02	187,56	174,58
500	201,36	197,19	185,17	171,52
1000	204,83	193,38	184,98	168,65

Z tabulek 6 a 7 je patrné, že se zvyšující se postupovou rychlostí dochází ke snížení objemu ubraného materiálu, což je v souladu s tím, že postupová rychlost souvisí s dobou působení paprsku na materiál. Na druhou stranu jsem nenarazil na fakt, že se zvyšující se postupovou rychlostí až do jisté hodnoty dochází k nárůstu rychlosti úběru materiálu (tak jako to publikují někteří zahraniční autoři). To může být způsobeno několika faktory:

- Vlastnostmi materiálu. Pro ocel mohou být rychlosti, při kterých tento jev nastává nižší než mnou testované. Působící část paprsku je v mém případě využita dostatečně efektivně.
- Počtem radiálních posuvů do materiálu. S narůstajícím počtem posuvů do materiálu působí paprsek pod jinými úhly a v odlišných hloubkách záběru. Při každém posuvu paprsku se tedy mění parametry procesu a na to navazující ubíraný objem materiálu. Je reálné, že by se zvyšující se postupovou rychlostí mohlo dojít ke zrychlení úběru materiálu během prvních

záběrů paprsku, nicméně jelikož bylo provedeno 9 bočních posuvů do materiálu, nelze takový jev z naměřených výsledných průměrů prokazatelně potvrdit.

Průměr vzorku v závislosti na postupové rychlosti je ukázán na obrázku 37. Jak je vidět, ani největší úběr materiálu při rychlosti 10 mm/min a frekvenci otáčení 250 ot./min nestačil k tomu, aby bylo dosaženo průměru definovaného relativní pozicí paprsku vůči vzorku. Abychom tedy docílili nižšího průměru vzorku, museli bychom použít nižší postupovou rychlost.

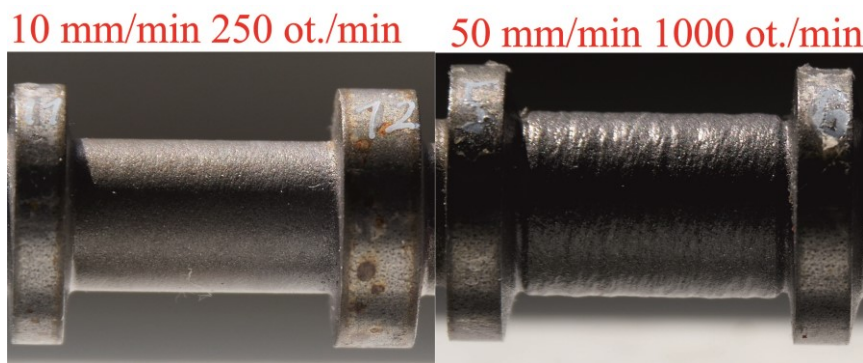


Obr. 37. Změna průměru vzorku v závislosti na postupové rychlosti a frekvenci otáčení

Nelze přesvědčivě tvrdit, že s narůstající hodnotou frekvence otáčení klesá objem ubraného materiálu. Hodnoty sice mají očekávaný trend pro rychlosti posuvu 20 mm/min a 50 mm/min, ale při postupové rychlosti 10 mm/min a 40 mm/min není jev jednoznačný. Jedním z vysvětlení může být chyba v experimentálním nastavení s tím, že paprsek nebyl vhodně zarovnán do stejné počáteční pozice jako v ostatních případech. Drobné rozdíly naznačují, že k měření průměru při testování vlivu frekvence otáčení by bylo vhodnější použít jiný přístroj s vyšší přesností. Z výsledků je evidentní, že změna frekvence otáčení nemá tak velký vliv na objem ubraného materiálu jako změna postupové rychlosti.

Z tabulek 5 a 6 je patrné, že pro stejný počet průchodů paprsku každou jednotlivou částí vzorku, byly naměřeny různé výsledné průměry vzorku. Tvzení, že objem ubraného materiálu zásadně nesouvisí pouze s počtem průchodů paprsku každou částí materiálu, tedy nejspíše platí. Nelze tedy kompenzovat zvýšenou postupovou rychlost pouze snížením frekvence otáčení.

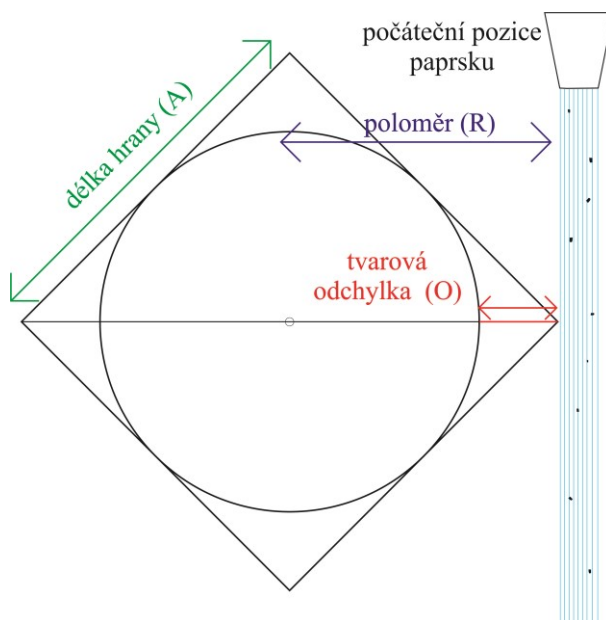
Vizuálně je patrné, že s rostoucí rychlostí posuvu paprsku, narůstá i drsnost povrchu materiálu (obr. 38). Kvantitativně jsem zkoušel vyjádřit kvalitu povrchu rozdílem průměru obou způsobů měření posuvkou uvedených výše. To znamená, že jako rozdíl obou hodnot je brána hodnota průměru vzorku měřeného širší částí posuvného měřidla, od které se odečetla hodnota průměru měřeného tenčí částí měřidla. Přesnost takového měření je ovšem velmi nízká a výsledné hodnoty neposkytovaly žádnou cennou informaci.



Obr. 38. Porovnání kvality povrchu vzorků s kruhovým průřezem a různými parametry

5.2.2 Měření na vzorku se čtvercovým průřezem

Cílem dalšího experimentu bylo srovnání naměřených hodnot na čtvercovém průřezu vzorku s hodnotami na vzorku s průřezem kruhovým. Ohodnocení vhodnosti použití jiných než kruhových průřezů je uvedeno v jiných kapitolách. Při soustružení vzorku se čtvercovým průřezem byly vyjma počtu bočních posuvů do materiálu (a tedy celkového posuvu paprsku do materiálu) použity stejné parametry jako v případě kruhového průřezu (tabulka 4). Bylo použito deseti bočních posuvů, což by mělo zpřesnit výsledky, potenciálně ovlivnitelné tvarem vzorku (viz dále). Jako poloměr vzorku byla definována polovina délky úhlopříčky. Počáteční pozice paprsku byla nastavena tak, aby byla v těsné blízkosti se hranou, přičemž po spuštění čerpadla se čistý vodní paprsek přímo nedotýkal materiálu vzorku (viz obdobné nastavení jako na obrázku 34). Aby nedošlo ke zkreslení vlivem tvaru průřezu a vzorek mohl být dobře proměřen, bylo zapotřebí, aby paprsek překonal určitou vzdálenost do středu k ose materiálu (tvarová odchylka O), od které by se dalo uvažovat o obrábění kruhového průřezu (obr. 39).



Obr. 39. Znázornění nastavení soustružení vzorku se čtvercovým průřezem

Byla vypočtena tvarová odchylka pomocí následujícího vztahu:

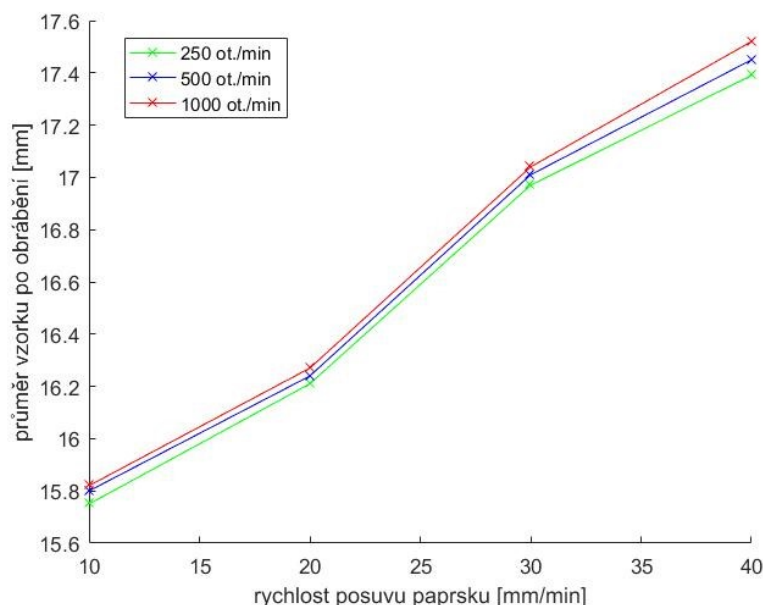
$$O = R - \frac{1}{2} A = \frac{1}{2} \left(\sqrt{A^2 + A^2} - A \right) \quad (5.2)$$

Pro čtvercový průřez s délkou hrany 18 mm byla určena velikost tvarové odchylky 3,7 mm. To znamená, že s použitím stejné hloubky záběru 0,5 mm se dostaneme za rozměr tvarové odchylky po 8 posunech. Celkový posuv paprsku do materiálu byl 5 mm. Kvůli bezpečné vzdálenosti vzorku od usměrňovací trubice bylo nutno zvýšit pozici trubice. Výsledný průměr byl měřen na dvou pozicích vždy desetkrát způsobem uvedeným v předchozí podkapitole. Naměřené hodnoty udává tabulka 8.

Tabulka 8 Finální průměry vzorku (2 experiment)

frekvence otáčení (ot./min)	rychlost posuvu (mm/min)			
	10	20	40	50
250	15,75 ± 0,79	16,21 ± 0,81	16,97 ± 0,85	17,39 ± 0,87
500	15,80 ± 0,79	16,24 ± 0,81	17,01 ± 0,85	17,45 ± 0,87
1000	15,82 ± 0,79	16,27 ± 0,81	17,04 ± 0,85	17,52 ± 0,88

Výsledné průměry jsou dále graficky znázorněny na obrázku 40.

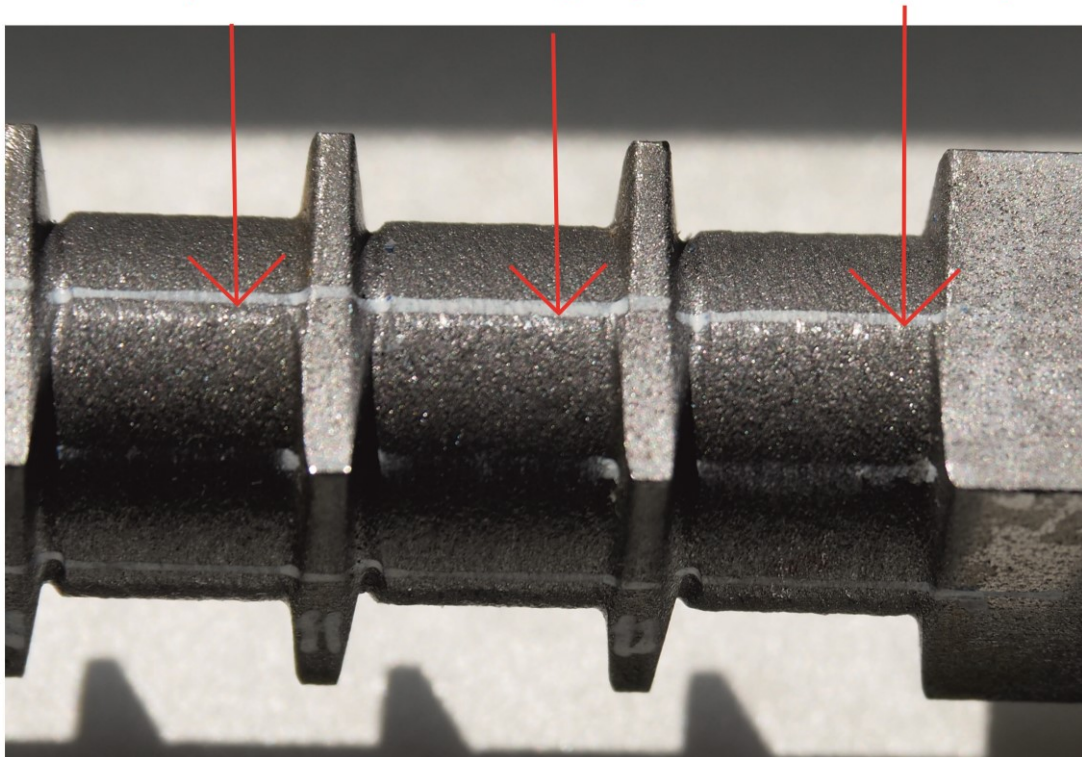


Obr. 40. Změna průměru vzorku v závislosti na postupové rychlosti a frekvenci otáčení pro čtvercový průřez

Je důležité poznamenat, že v případě postupové rychlosti 40 mm/min a 50 mm/min bylo měření průměru provedeno na povrchu zkresleném („nodořezy“ - memory efekt), díky nedostatečnému úběru materiálu (obr. 41). Tento jev ovšem nemá vliv na výsledné hodnoty průměru, jelikož měření bylo provedeno vždy na stejném místě vzorku. Je evidentní, že zvyšující se postupová rychlost snižuje množství ubraného materiálu.

Z výsledků je patrné, že obdobně jako v předchozím případě jsem zjistil, že ze zvolených testovaných parametrů hraje postupová rychlost dominantní roli. Zdá se, že zvyšující se frekvence otáčení snižuje množství materiálu, nicméně abychom toto tvrzení mohli věrohodně ověřit, potřebovali bychom využít jiné a přesnější metody měření průměru. Nezdá se ovšem, že by takové měření mělo příliš smysl.

zkreslení způsobené čtvercovým průřezem - memory efekt



Obr. 41. Zkreslení výsledného povrchu při použití vzorku se čtvercovým průřezem

Z obou provedených měření je vidět, že postupová rychlost je významnou proměnnou, definující výsledný průměr soustruženého vzorku. Frekvence otáčení se zdá mít nepatrný vliv na výsledný průměr vzorku (a to i přesto, že v rovnici 4.30 se jeví jako podstatný parametr). Zdůvodněním může být porovnání rychlosti abraziva při jeho dopadu a rychlosti povrchu vzorku během otáčení. Dopadová rychlost částice abraziva se pohybuje v řádu stovek metrů za sekundu. Naproti tomu, pokud bychom použili vztah 3.11, došli bychom k závěru, že rychlost povrchu při 250 ot./min, 500 ot./min a 1000 ot./min vzorku o průměru 20 mm nabývá hodnot 0,26, 0,52 a 1,04 m/s. Frekvenci otáčení z uvedeného považuji za nepodstatný parametr k určení výsledného objemu vzorku.

Prozatím nelze vytvořit ani regresní model pro rychlost posuvu a frekvenci otáčení. Při postupném posuvu paprsku do materiálu dochází ke změnám dalších parametrů, spojených s relativní pozicí paprsku a povrchu materiálu, jejichž vliv prozatím neznáme a které jsou testovány v následujících kapitolách.

5.3 Zkoumání objemu ubraného materiálu v závislosti na celkovém posuvu paprsku

Aby bylo možno lépe pochopit předchozí měření a celkově proces soustružení, provedl jsem experiment s postupně se zvyšujícími se záběry paprsku do materiálu. Hlavním cílem experimentu tedy bylo vyjádřit především vliv geometrických parametrů na výsledný průměr vzorku. Experiment byl proveden na vzorcích s kruhovým průřezem o průměru 20 mm s parametry uvedenými v tabulce 9.

Tabulka 9 Parametry experimentu s navyšujícím se celkovým posuvem paprsku do materiálu (kruhový průřez)

tlak vody	380	MPa
průtok abraziva	250	g/min
velikost abraziva	80	MESH
typ abraziva	australský granát	
hloubka záběru	0,5; 0,75; 1	mm
počet bočních posuvů do materiálu	1-10	
délka axiálního řezu paprsku	12	mm
postupová rychlost	20	mm/min
frekvence otáčení	500	ot./min

Pro každou hloubku záběru bylo provedeno několik po sobě navazujících řezů, přičemž po každém řezu byl celkový posuv paprsku do materiálu navýšen o hodnotu hloubky záběru.

Počet bočních posuvů paprsku do materiálu je pro jednotlivé hloubky záběru uveden v tabulce 10.

Tabulka 10 Počet bočních posuvů paprsku do materiálu

hloubka záběru	počet bočních posuvů do materiálu
0,5	10
0,75	6
1	5

Dohromady bylo tedy provedeno 21 řezů a výsledné průměry byly naměřeny oběma způsoby (viz obrázek 36). Již z předchozího měření je jasné, že hloubka záběru do materiálu (a s ní související parametry) nebude souhlasit se strojovým posuvem paprsku do materiálu. Proto bylo zavedeno několik vyhodnocujících parametrů pro toto měření:

- Změna průměru vzorku - rozdíl hodnoty průměru vzorku při určitém celkovém posuvu paprsku do materiálu a průměru vzorku po navýšení hloubky celkového posuvu paprsku do materiálu o hloubku záběru do materiálu.
- Reálná hloubka záběru do materiálu - parametr definovaný stejně jako hloubka záběru s tím rozdílem, že je závislá na aktuálním průměru vzorku po částečném úběru materiálu a strojovém posuvu (ideální hloubce záběru do materiálu).
- Střední úhel dopadu - hodnota úhlu dopadu paprsku na povrch materiálu v ose paprsku.
- Rozmezí působících úhlů - vypočítané z měnících se hodnot průměru vzorku a strojového posuvu paprsku. Toto rozmezí předpokládá paprsek válcovitého tvaru o průměru 1 mm.

Naměřené hodnoty pro hloubku záběru 0,5 mm jsou uvedeny v tabulce 11. Naměřené hodnoty pro hloubku záběru 0,75 mm a 1 mm jsou uvedeny v tabulce 12.

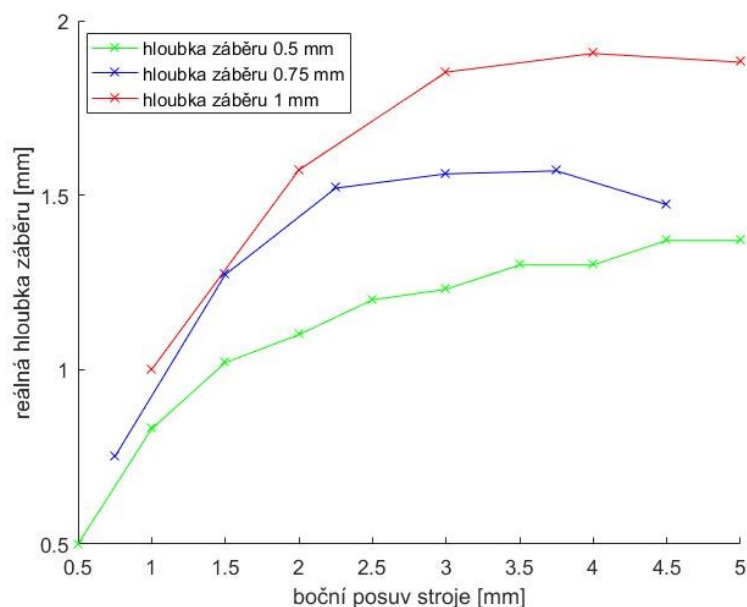
Tabulka 11 Průměr vzorku a vyvozené parametry pro hloubku záběru 0,5 mm

počet bočních posuvů	celkový boční posuv paprsku (mm)	průměr vzorku (mm)	změna průměru vzorku (mm)	reálná hloubka záběru (mm)	objem ubraného materiálu (mm ³)	střední dopadový úhel (°)	rozmezí dopadových úhlů (°)
1	0,5	19,66 ± 0,98	0,34	0,50	10,50	13	0-18
2	1	19,05 ± 0,95	0,62	0,83	18,76	20	14-24
3	1,5	18,20 ± 0,91	0,84	1,02	24,63	23	19-27
4	2	17,41 ± 0,87	0,80	1,10	22,32	25	21-28,5
5	2,5	16,46 ± 0,82	0,95	1,20	25,21	27	23-30,5
6	3	15,60 ± 0,78	0,86	1,23	21,68	28	24-32
7	3,5	14,61 ± 0,73	0,99	1,30	23,48	30	26-33,5
8	4	13,75 ± 0,69	0,86	1,30	19,11	31	27-35
9	4,5	12,74 ± 0,64	1,01	1,37	20,99	33	29-37
10	5	11,73 ± 0,59	1,01	1,37	19,47	34	30-38

Tabulka 12 Průměr vzorku a vyvozené parametry pro hloubku záběru 0,75 mm a 1 mm

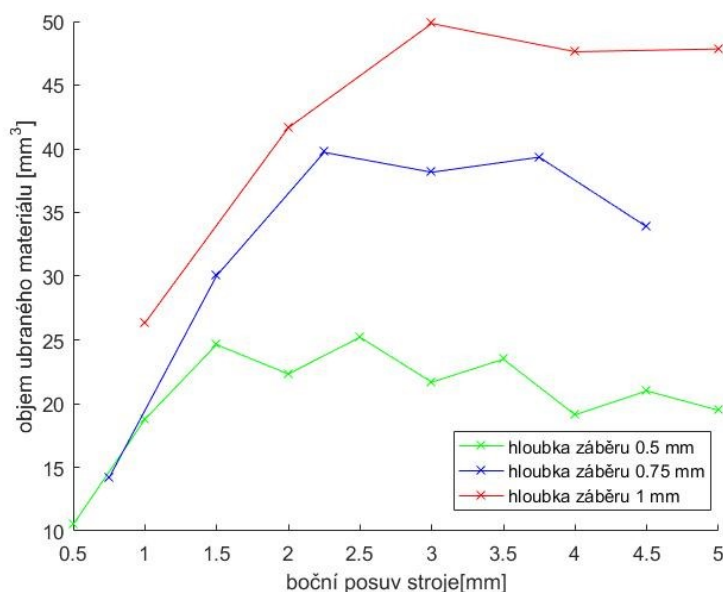
počet bočních posuvů	celkový boční posuv paprsku (mm)	průměr vzorku (mm)	změna průměru vzorku (mm)	reálná hloubka záběru (mm)	objem ubraného materiálu (mm ³)	střední dopadový úhel (°)	rozmezí dopadových úhlů (°)
1	0,75	19,54 ± 0,98	0,46	0,750	14,16	16	0-22
2	1,5	18,54 ± 0,93	1,00	1,272	30,03	25	19-30
3	2,25	17,12 ± 0,86	1,42	1,520	39,72	29	23,5-33
4	3	15,64 ± 0,78	1,48	1,561	38,16	31	25-35
5	3,75	13,95 ± 0,70	1,69	1,570	39,34	32	26,5-37
6	4,5	12,30 ± 0,62	1,64	1,473	33,87	33	26-38
1	1	19,14 ± 0,96	0,86	1,000	26,32	18	0-26
2	2	17,71 ± 0,89	1,44	1,572	41,65	27	20-33
3	3	15,81 ± 0,79	1,89	1,853	49,83	32	25,5-38
4	4	13,76 ± 0,69	2,05	1,906	47,62	35	28-41
5	5	11,34 ± 0,57	2,43	1,881	47,84	37	29-43,5

Je evidentní, že reálná hloubka záběru zdaleka neodpovídá výchozí představě, že by měla být rovna hloubce záběru dané strojovým posuvem (obr. 42).



Obr. 42. Reálná hloubka záběru v závislosti na strojovém posuvu do materiálu kruhového vzorku

Už při druhém bočním posuvu paprsku do materiálu došlo k navýšení reálné hloubky záběru na hodnotu okolo jednoho milimetru i pro hloubky záběru 0,5 mm a 0,75 mm. Objem ubraného materiálu při různém bočním posuvu paprsku je vidět na obrázku 43.

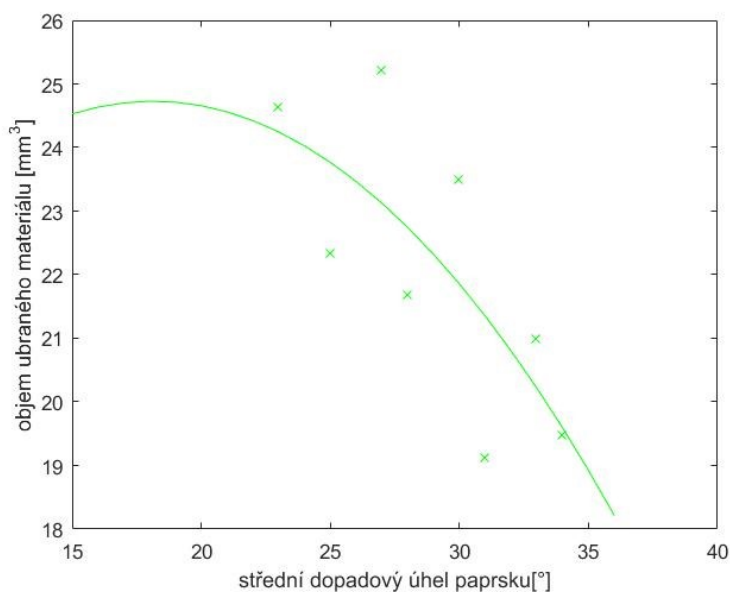


Obr. 43. Množství ubraného objemu materiálu v závislosti na bočním posuvu stroje

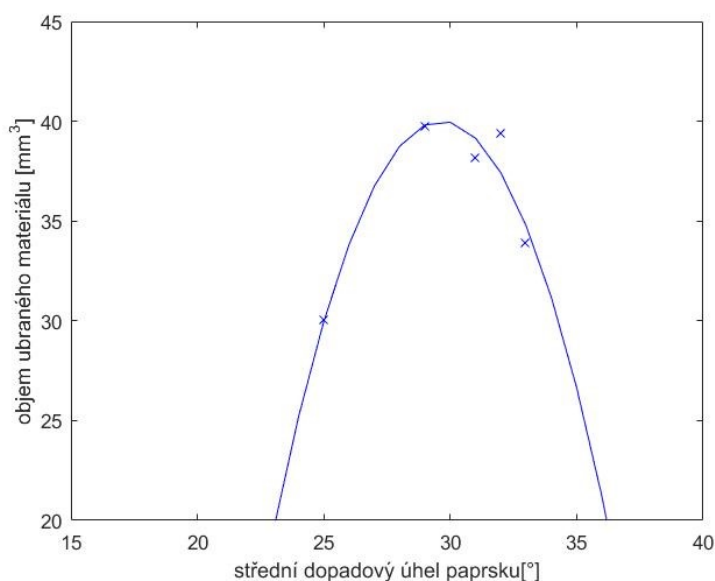
Oba dva grafy mají pouze informativní charakter. Parametrem procesu, který má smysl hodnotit kvantitativně je například dopadový úhel paprsku na materiál. S narůstajícím bočním posuvem paprsku do materiálu jsou evidentní fluktuace ubraného objemu materiálu. Tyto fluktuace poměrně dobře korespondují s rychlostí nárůstu reálné hloubky záběru na obrázku 42 (ve větších bočních posuvech stroje je patrné, že se hloubka záběru nemění). Je možné očekávat, že se snižujícím se průměrem vzorku je z geometrického hlediska jasné, že paprsek nebude mít možnost ubrat stejné

množství materiálu ani při stejné reálné hloubce záběru a podobných dopadových úhlech. Mimo dopadového úhlu, je tedy zapotřebí vyjádřit i souvislost ubraného objemu s aktuálním průměrem vzorku. Jev je nejlépe patrný při hloubce záběru 0,5 mm, ale je vidět i při vyšších hloubkách záběru.

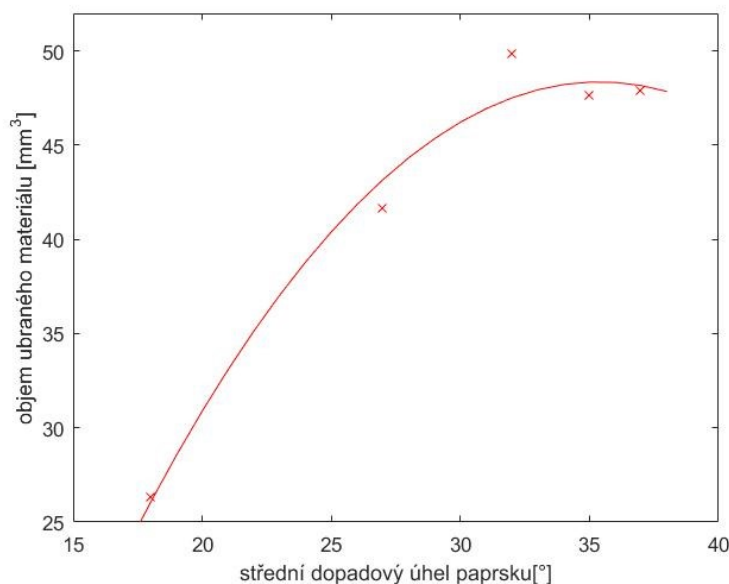
Celkový objem ubraného materiálu bude mít s narůstajícím bočním posuvem snižující se velikost, jak je patrné i z předešlých obrázků. Pokud vynecháme první dvě měření experimentu s hloubkou záběru 0,5 mm a první měření experimentu s hloubkou záběru 0,75 mm, kde není reálná hloubka záběru větší než průměr paprsku (čímž se pokusíme eliminovat vliv menší dopadové plochy paprsku na materiál), můžeme se pokusit závislost ubraného objemu materiálu na úhlu dopadu částic vyjádřit proložením naměřených dat regresní polynomiální křivkou druhého řádu (obr. 44 - 46).



Obr. 44. Ubraný objem materiálu v závislosti na úhlu dopadu paprsku (hloubka záběru 0,5 mm)



Obr. 45. Ubraný objem materiálu v závislosti na úhlu dopadu paprsku (hloubka záběru 0,75 mm)



Obr. 46. Ubraný objem materiálu v závislosti na úhlu dopadu paprsku (hloubka záběru 1 mm)

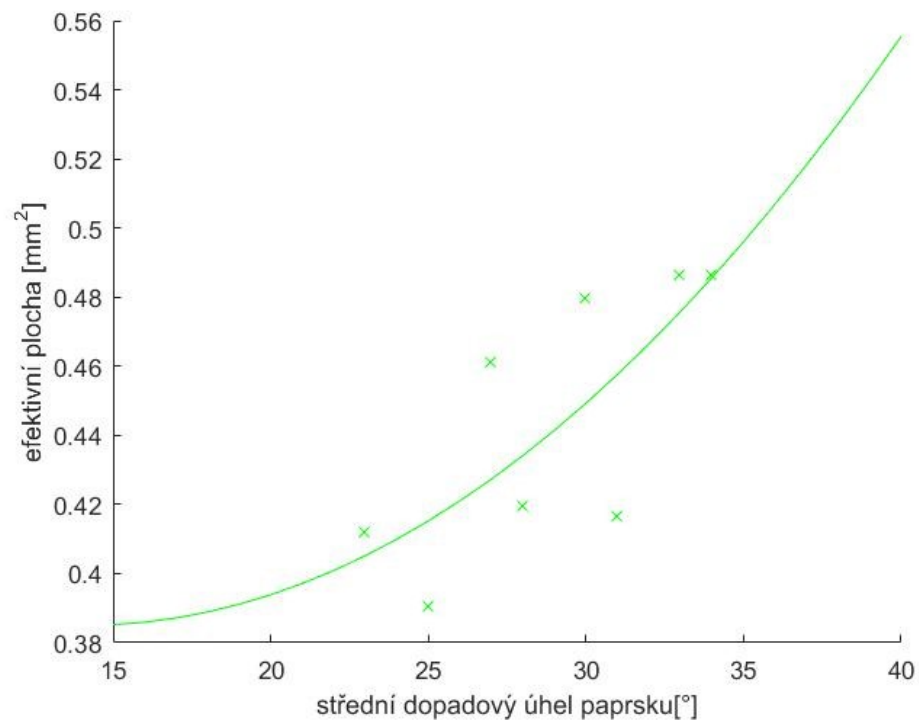
Abychom eliminovali zkreslení v podobě snížení maximálního možného objemu materiálu k úběru při daném geometrickém nastavení, potřebujeme také vědět maximální možný objem, který paprsek může obrotit, pokud bychom jej nechali působit dostatečně dlouhou dobu při námi požadovaném nastavení (velmi nízká postupová rychlost). Takový přístup by byl ovšem zdlouhavý a ekonomicky náročný.

Jinou možností je pomocí vztahu 5.3 vyjádřit efektivní plochu související s úběrem materiálu a zároveň eliminující uvedený jev.

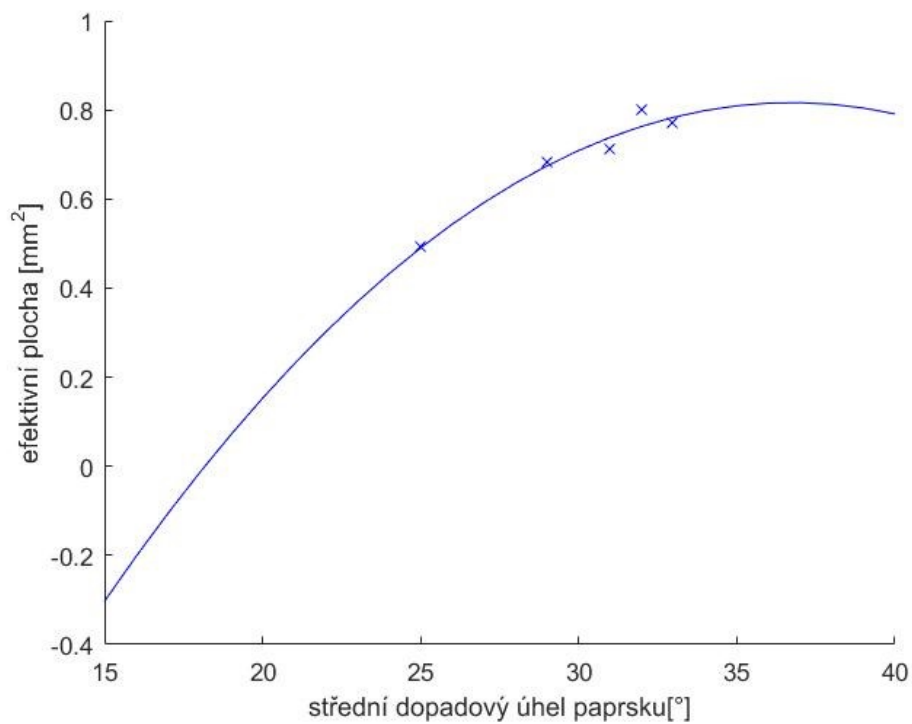
$$S_e = \frac{Q_c}{2\pi R_i} = \frac{\pi(R_p^2 - R_f^2)D}{2\pi R_p} \quad (5.3)$$

Hodnoty efektivní plochy v závislosti na dopadovém úhlu jsou vykresleny na obrázku 47 - 49 (s polynomiální regresí druhého řádu). Parametr efektivní plochy může být zkreslen tím, že neznáme původní poloměr vzorku po každé otočce materiálu (proto je nutno naměřené výsledky brát s rezervou). Jinak ale jde o nejlíp vyjádřenou závislost „parametru efektivity“ na dopadovém úhlu paprsku a s ním spojených parametrů.

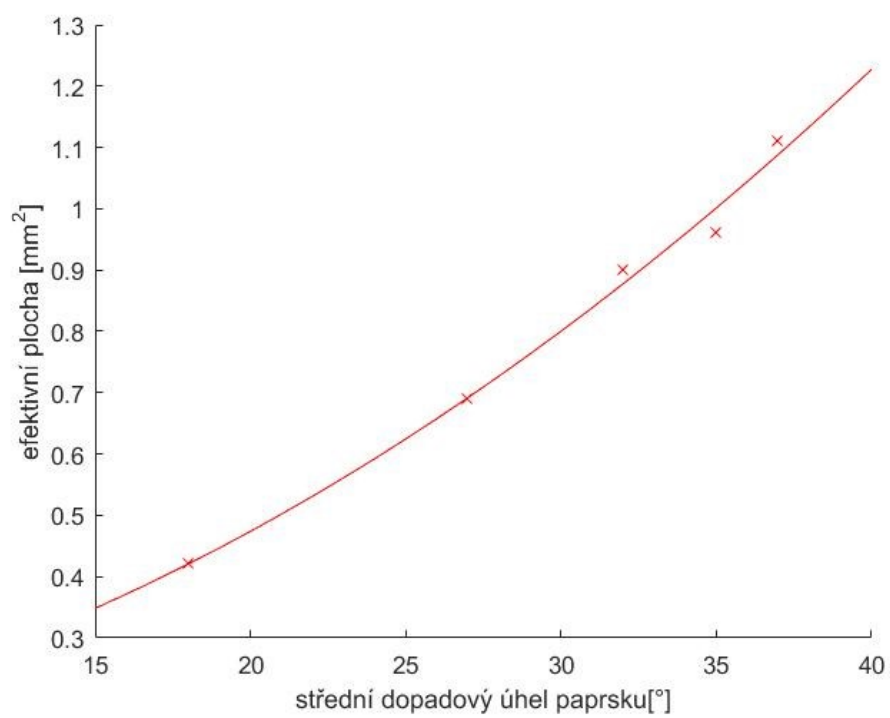
Jak je vidět z obrázků 47 - 49, je patrný nárůst efektivní plochy s narůstajícím úhlem dopadu paprsku. Předpokládám, že tato závislost nebude dále narůstat, ale dosáhne při určitém úhlu svého maxima. Bohužel další posuvy paprsku do materiálu nebyly realizovány a tím pádem se jedná o pouhý předpoklad. Nicméně je jisté, že při vyšších dopadových úhlech (platí i pro uvedené experimenty) bude paprsek ubírat materiál jak řezným, tak i deformačním úběrem a tato úhlová závislost je kombinací obou typů dohromady. Závěrem lze tedy říci, že s narůstajícím dopadovým úhlem se zvyšuje efektivita procesu s tím, že je předpokládán maximální efektivní úhel, který bude zapotřebí určit pomocí dalších experimentů. Mimo to je jisté, že zavedením efektivní plochy se nepodařilo potlačit negativní efekt fluktuací experimentálních hodnot. Skutečnou příčinou tohoto jevu tedy může být systematická chyba, která vznikla v procesu soustružení a nejvíce se projevila při hloubce záběru 0,5 mm.



Obr. 47. Závislost efektivní plochy na středním dopadovém úhlu paprsku (hloubka záběru 0,5 mm)



Obr. 48. Závislost efektivní plochy na středním dopadovém úhlu paprsku (hloubka záběru 0,75 mm)



Obr. 49. Závislost efektivní plochy na středním dopadovém úhlu paprsku (hloubka záběru 1 mm)

5.4 Měření kvality povrchu vzorků s různými průřezy

Všechny experimenty provedené v předchozích dvou podkapitolách, byly provedeny i na vzorcích se čtvercovým průřezem a experiment s postupnou hloubkou záběru byl proveden i na vzorku se šestiúhelníkovým průřezem. Experiment s postupovou rychlostí a frekvencí otáčení byl rozebrán v předchozích podkapitolách. Dále byl testován vzorek se čtvercovým průřezem při postupně se zvyšujících hloubkách záběru. Parametry tohoto experimentu jsou uvedeny v tabulce 13 a 14. Sledovaným výsledkem měření bylo zjištění, jestli budeme schopni osoustružit vzorek s různým průřezem na kruhový tvar vzorku.

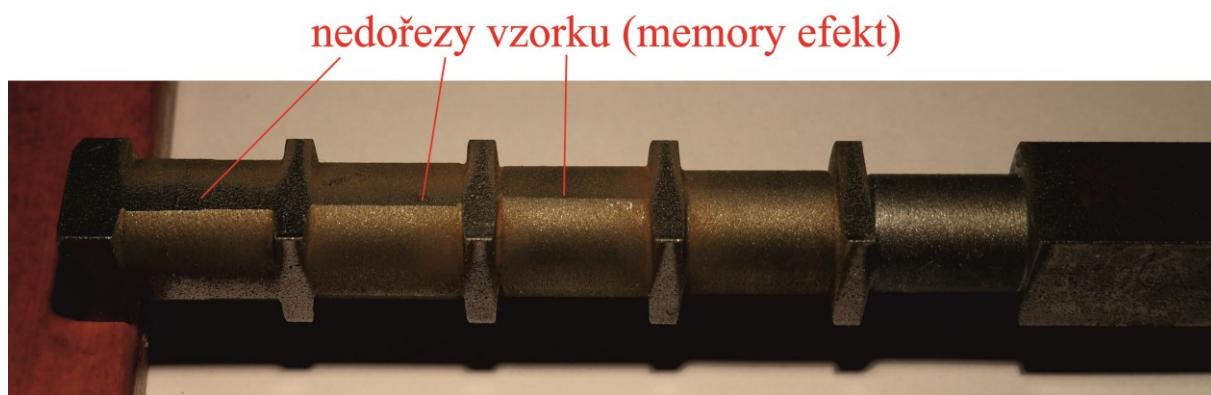
Tabulka 13 Parametry experimentu s navyšujícím se celkovým posuvem paprsku do materiálu (čtvercový průřez)

tlak vody	380	MPa
průtok abraziva	250	g/min
velikost abraziva	80	MESH
typ abraziva	australský granát	
hloubka záběru	0,5; 0,75; 1	mm
délka axiálního řezu paprsku	12	mm
postupová rychlost	20	mm/min
frekvence otáčení	500	ot./min

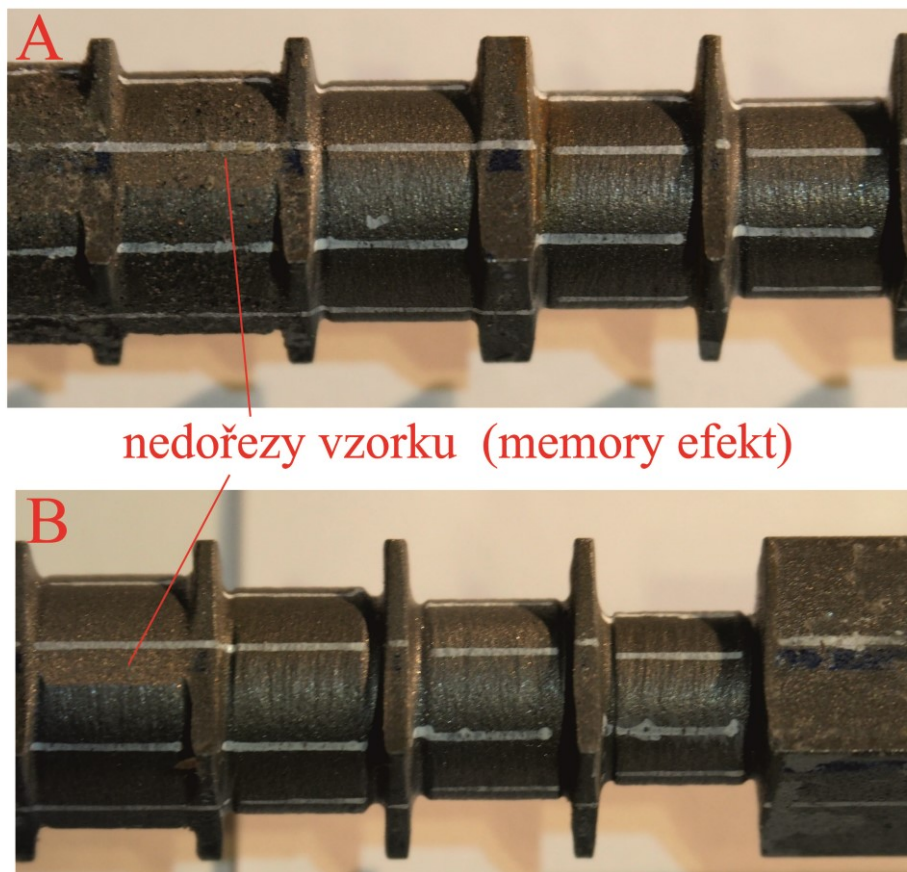
Tabulka 14 Počet bočních posuvů paprsku do materiálu pro různé hloubky záběru (čtvercový průřez)

hloubka záběru	počet bočních posuvů do materiálu
0,5	5
0,75	4
1	4

Vzhledem ke tvaru průřezu materiálu nemá smysl zajíždět do materiálu od prvního bočního posuvu (došlo by pouze k ubírání tvarové odchylky, viz obrázek 39). Paprsek do materiálu zajížděl při hloubce záběru 0,5 mm postupně 6-krát během prvního řezu. Následující řezy proběhly až do celkového posuvu 5 mm. V případě hloubky záběru 0,75 mm se jednalo o celkový posuv od 3,75 mm do 6 mm. V případě hloubky záběru o 1 mm šlo o rozmezí od 4 do 7 mm. Tvar osoustruženého vzorku je zobrazen na obrázku 50 a 51.



Obr. 50. „Nedořezy“ na vzorku čtvercového průřezu s hloubkou záběru 0,5 mm



Obr. 51. „Nedořezy“ na vzorku čtvercového průřezu s hloubkou záběru 0,75 mm (A) a 1 mm (B)

Při nižším počtu bočních posuvů do materiálu jsou patrné nedořezy, které se s nárůstem počtu posuvů zmenšují, a jejich hrana se posouvá více do středu hrany čtverce, až nakonec vymizí úplně. Orientační měření výsledného průměru jsem provedl vždy uprostřed hrany čtverce a na „úhlopříčkách“, otočených oproti středu hrany přibližně o 45°. Vždy se jednalo o minimálně deset měření, které byly zprůměrovány. Výpovědní hodnotu má pouze měření ve vyšších bočních posuvech paprsku do materiálu (tabulka 15).

Tabulka 15 Změna průměru vzorku v souvislosti s pozicí měření

celkový boční posuv paprsku (mm)	průměr vzorku úhlopříčka (mm)	průměr vzorku střed hrany (mm)
5	$16,20 \pm 0,81$	$16,23 \pm 0,81$
6	$14,63 \pm 0,73$	$14,59 \pm 0,73$
7	$13,09 \pm 0,65$	$12,97 \pm 0,65$

Z předchozí tabulky se zdá, že uvedený memory efekt se projevuje i při nejvyšším počtu posuvů paprsku do materiálu, což je lépe vidět při vyšších hloubkách záběru. Nicméně měření bylo provedeno posuvným měřidlem, což v sobě skrývá poměrně velkou nejistotu.

Obrázek 52 ukazuje experiment provedený na vzorku šestiúhelníkového průřezu, kde byla testována hloubka záběru 0,5 mm s postupným bočním posuvem paprsku do materiálu. Celkový posuv do materiálu byl při prvním měření 2 mm, s postupným navýšením až do 5 mm.



Obr. 52. Soustružený vzorek se šestiúhelníkovým průřezem

Nedořezy na vzorku nebyly patrné. Provedl jsem měření průměru při nejvyšším celkovém posuvu paprsku do materiálu (5 mm). Jednalo se o měření na dvou místech, uprostřed hrany a na hraně původního šestiúhelníku. Bylo provedeno deset měření v každé pozici a výsledky zprůměrovány. Průměr vzorku uprostřed hrany byl shodně jako na hraně původního šestiúhelníku 12,23 mm. Z pouhého měření šuplerou tedy nelze pozorovat odchylku od výsledného kruhového tvaru.

Pro porovnání byla provedena měření drsnosti a kruhovitosti povrchu vzorku různých průřezů. Kruhovitost a drsnost vzorků s kruhovým průřezem je uvedena v tabulce 16 a 17.

Tabulka 16 Změna drsnosti a kruhovitosti povrchu v závislosti na postupové rychlosti a frekvenci otáčení

postupová rychlost (mm/min)/frekvence otáčení (ot./min)	Ra (μm)	Rz (μm)	Odchylka kruhovitosti (mm)
10/250	5,650	38,302	0,136
20/250	6,039	37,541	0,120
40/250	9,705	57,780	0,161
40/500	8,561	55,534	0,089
40/1000	8,927	55,967	0,136
50/250	21,331	95,426	0,122
50/500	18,328	91,149	0,108
50/1000	22,521	97,601	0,126

Tabulka 17 Změna drsnosti a kruhovitosti vzorku v závislosti na hloubce záběru a celkovém bočním posuvu paprsku do materiálu

celkový boční posuv paprsku (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)	Odchylka kruhovitosti (mm)
1,5	6,90	8,790	0,120
3	8,037	10,308	0,147
4,5	8,537	10,722	0,116
1	8,241	10,403	0,129
3	10,787	13,473	0,114
5	9,910	12,124	0,162

Naměřené hodnoty pro čtvercový průřez jsou uvedeny v tabulce 18.

Tabulka 18 Drsnost a odchylky kruhovitosti vzorku se čtvercovým průřezem

	celkový posuv (mm)	odchylka kruhovitosti (mm)
hloubka záběru 0,5 mm	4,5	0,186
	5	0,17
hloubka záběru 1 mm	7	0,165
postupová rychlost (mm/min)/frekvence otáčení (ot./min)	10/250	0,151
	20/1000	0,146

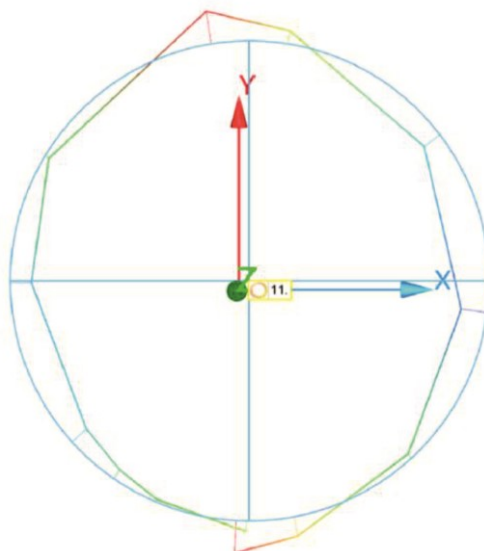
V případě šestiúhelníku byly naměřeny pouze dvě hodnoty odchylky kruhovitosti (tabulka 19).

Tabulka 19 Odchylky kruhovitosti vzorku se šestiúhelníkovým průřezem

celkový boční posuv paprsku (mm)	odchylka kruhovitosti (mm)
3	0,142
5	0,135

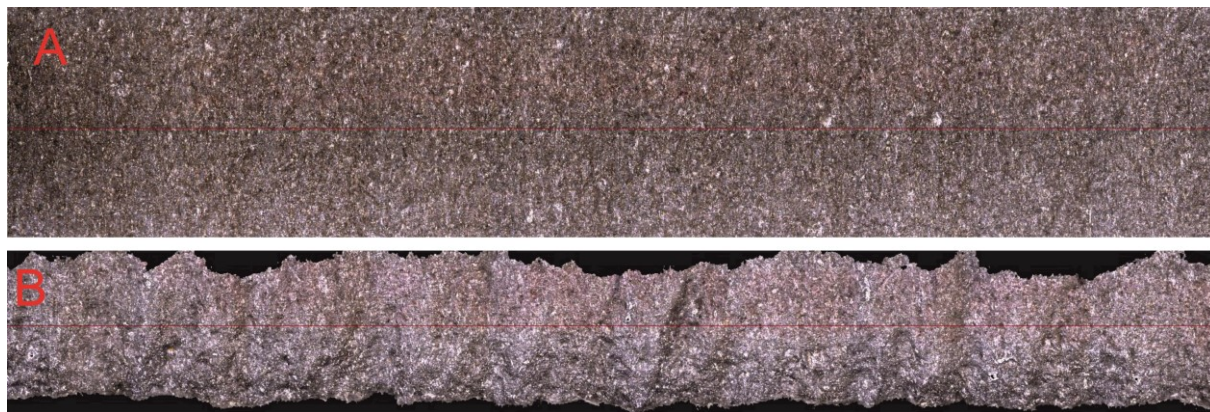
Podle očekávání, platí, že nejnižší odchylky kruhovitosti byly zaznamenány u vzorku s kruhovým průřezem. Naopak nejvyšších hodnot dosahovaly vzorky čtvercového průřezu. Spojitost odchylky kruhovitosti s parametry procesu je patrná v tabulce 18, kde při hloubce záběru 1 mm v celkovém bočním posuvu 7 mm byla zaznamenána nejvyšší hodnota odchylky kruhovitosti vzorku kruhového průřezu.

Výsledný tvar povrchu řezaných vzorků byl ve všech případech eliptický (obr. 53). Tento jev může být způsoben nepřesným upevnění vzorku do čelistí soustruhu.

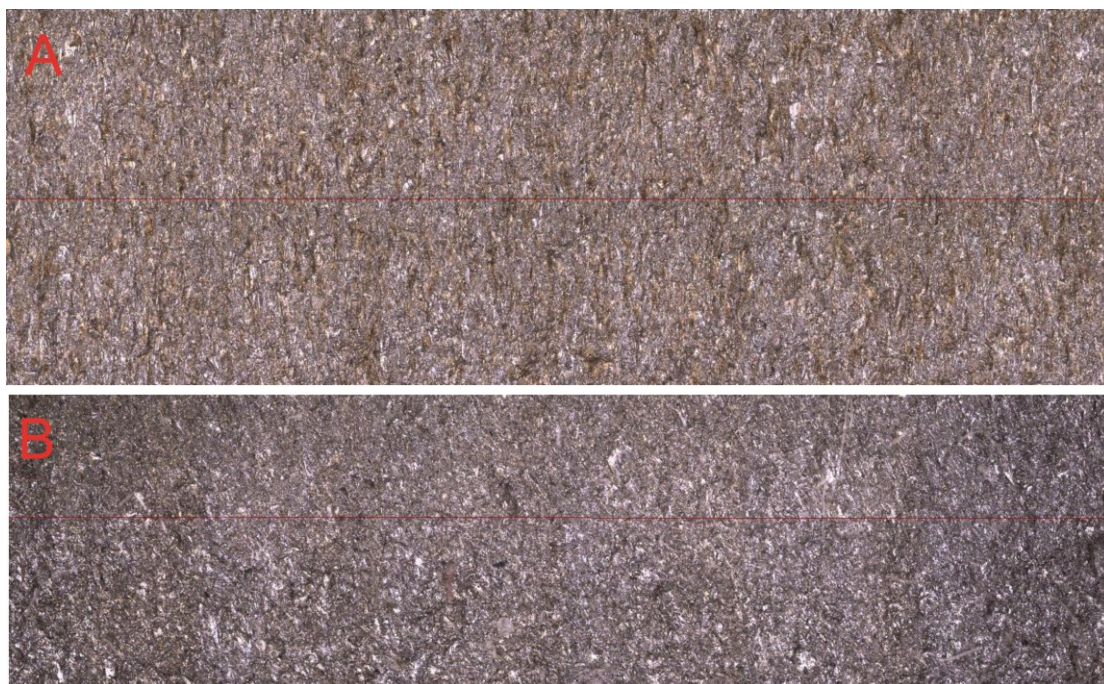


Obr. 53. Přibližný výsledný eliptický tvar soustružených vzorků

Drsnost povrchu kruhových vzorků byla nejvyšší při parametrech hloubky záběru 0,5 mm, postupové rychlosti 50 mm/min, frekvenci otáčení 1000 ot./min a celkovému posuvu paprsku do materiálu 9 mm. Jedná se tedy o řez, kde paprsek ubral nejméně materiálu, což může souviset s dominantním deformačním úběrem materiálu, který souvisí s nízkou kvalitou obráběného povrchu. Tento předpoklad potvrzují i další hodnoty, kde s narůstajícím celkovým posuvem paprsku do materiálu (kde se více projevuje deformační úběr) narůstá i drsnost. Porovnání povrchů při postupové rychlosti 10 mm/min a 50 mm/min je ukázáno na obrázku 54. Porovnání povrchů při celkovém posuvu paprsku do materiálu 1 mm a 5 mm je ukázáno na obrázku 55.



Obr. 54. Povrch materiálu při postupové rychlosti 10 mm/min (A) a 50 mm/min (B)



Obr. 55. Povrch materiálu při celkovém bočním posuvu paprsku 1 mm (A) a 5 mm (B)

6 ZÁVĚR

Práce se zaměřovala na analýzu proměnných při soustružení abrazivním vodním paprskem. Provedl jsem rešerši autorů zaměřujících se na soustružení paprskem. Autoři ve svých článcích rozdělují soustružení do dvou módů podle relativní pozice paprsku a materiálu. Ve svých pracích popisovali vliv různých parametrů na výslednou kvalitu povrchu a rychlost úběru materiálu. Spousta těchto parametrů se však v praxi udržuje na konstantní úrovni, aby bylo docíleno co nejvyšší efektivity procesu. Další parametry jsou již dobře popsány v rámci analytických modelů řezání abrazivním vodním paprskem. Dále vzniklo několik vizualizačních studií.

Proces soustružení abrazivním vodním paprskem byl několikrát modelován. Drtivá většina použitých modelů je statistických, což limituje jejich použitelnost při odlišných podmínkách procesu. Jediný nalezený analytický model využívá Finnieho teorie eroze. Problémem tohoto modelu je určení konstant definujících materiál a dopadající částici. Někteří z autorů zvolili kombinaci vyjádření geometrických souvislostí procesu a počítačových simulací dopadu abrazivních částic na povrch materiálu. Model vycházející zcela z fyzikálních zákonů jsem nenalezl. Naměřená data jsem ovšem s tímto modelem také nemohl srovnat. Model sice uvádí použité experimentálně získané konstanty procesu, nicméně chybí zmínka o tom jakým způsobem a za jakých podmínek byly tyto konstanty určeny. I samotné veličiny, které se zdají být jednoduše a jednoznačně určené (jako například dopadová rychlost paprsku), se mohou odlišovat, protože některé z modelů zanedbávají vliv některých parametrů.

Podle literárních poznatků jsem zvolil víceprůchodový tangenciální mód soustružení, kvůli údajně lepší schopnosti předpovědět výsledný průměr vzorku a lepší kvalitě povrchu materiálu. Dále byl materiál ubírán postupně po jednotlivých vrstvách, jelikož jsem předpokládal nejrychlejší a nejkvalitnější úběr materiálu při nízkých dopadových úhlech paprsku. Protože se jedná o prvotní testování soustružení AWJT, trajektorie řezu byla jednoduchá, lineární. Před samotným měřením bylo vytvořeno několik předpokladů a byl uveden možný fyzikální popis související se zákonem zachování energie interakce částice abraziva a povrchu materiálu.

Testované veličiny jsem zvolil tak, aby se jednalo o nové parametry oproti obyčejnému řezu abrazivním paprskem nebo takové, jejichž vliv se podle mého názoru zásadně odlišuje oproti řezu. Jedná se o postupovou rychlost paprsku, frekvenci otáčení, hloubku záběru do materiálu a počet bočních posuvů paprsku do materiálu, úzce související s hloubkou záběru. Postupová rychlost i frekvence otáčení jsou parametry měnitelné na rozdíl od hloubky záběru a počtu bočních posuvů. Oproti obyčejnému řezu se mění při soustružení mnohem více parametrů v souvislosti s uvedenými veličinami (díky rozdílnému geometrickému uspořádání). Veličiny související více s geometrickým uspořádáním (hloubka záběru a počet bočních posuvů) byly testovány zvlášť. Soustružil jsem vzorky z oceli.

Experimenty byly rozděleny na tři části:

- Testování vlivu proměnných parametrů procesu (postupová rychlost, frekvence otáčení)
- Testování vlivu geometrického nastavení procesu (hloubka záběru do materiálu)

- Testování parametrů kvality výsledného obrobku, použitelnosti a možností soustružení vzorků jiného než kruhového průřezu

Výstupními veličinami měření byl průměr vzorku po soustružení, drsnost vzorku a kruhovitost vzorku. Průměr vzorku byl měřen pomocí posuvného měřidla. Tento způsob měření v sobě obsahuje velké množství nejistot, které by bylo obtížné určit. Jedná se například o nepřesné uchycení vzorku do čelistí soustruhu, špatně vycentrovanou osu vzorku, nehomogenitu ubíraného materiálu a jiné chyby. Z tohoto důvodu není možné zcela jasně určit regresní model některých parametrů procesu. Výsledky měření tedy názorně ukazují přibližné chování paprsku během soustružení.

Dle předpokladů vyplynulo, že postupová rychlost je jedním z klíčových parametrů ovlivňujících množství ubraného materiálu. S klesající postupovou rychlostí se zvyšuje objem ubraného materiálu. Naproti tomu je vliv frekvence otáčení vzorku na ubraný objem zanedbatelná. Předpokládám ale, že s rostoucí frekvencí otáčení bude množství ubraného materiálu mírně klesat. Byl zaveden počet průchodů paprsku materiálem v závislosti na frekvenci otáčení a rychlosti posuvu.

Z měření je patrné, že předpoklad o souvislosti počtu průchodů přímo s ubraným množstvím materiálu byl víceméně vyvrácen. V případě vzorku o čtvercovém průřezu byl jev souvislosti narůstající postupové rychlosti a množství ubraného materiálu ještě více patrný, jelikož na povrchu vzorku byly viditelné „nedořezy“. Důležitým poznatkem je, že ani v případě „nejvýhodnějšího“ nastavení vzhledem k efektivitě úběru materiálu nebylo dosaženo požadovaného průměru vzorku (daného konečnou strojovou pozicí paprsku v materiálu).

V další experimentální části paprsek postupně zabíral do materiálu až do celkového posuvu paprsku do materiálu. Z měření vyplynulo, že geometrické parametry procesu se pro každý další boční posuv paprsku do materiálu významně liší a proto byly zavedeny nové veličiny. Jedná se o reálnou hloubku záběru do materiálu, střední dopadový úhel paprsku na povrch materiálu a rozmezí dopadových úhlů související s průměrem paprsku. Všechny tyto parametry byly vypočteny z předem nastaveného strojového posuvu paprsku a naměřených hodnot konečného průměru vzorku. Úhel dopadu jsem bral jako klíčový parametr související s množstvím ubraného materiálu.

Jelikož je objem ubraného materiálu závislý na průměru vzorku, rozhodl jsem se tento vliv eliminovat pomocí zavedení veličiny efektivní plochy, která by měla být základním parametrem určujícím efektivitu procesu. Vykreslil jsem tuto efektivní plochu v závislosti na středním dopadovém úhlu do grafu. Oproti předpokladu došlo s narůstajícím úhlem dopadu k nárůstu velikosti efektivní plochy u různých hloubek záběru. Nicméně v případě hloubky záběru 0,5 mm je evidentní, že trend naměřených hodnot s rostoucím úhlem dopadu směřuje k určité maximální hodnotě efektivní plochy. Tento předpoklad ovšem nemohu prokázat. Měření při této hloubce záběru je ovšem významně ovlivněno blíže neurčenou systematickou chybou. V souvislosti s objemem ubraného materiálu se jeví ze všech testovaných hloubek záběru jako nejvýhodnější 1 mm, což by se dalo vysvětlit vyššími dopadovými úhly paprsku na materiál. Při zkoumání procesu soustružení abrazivním vodním paprskem se jeví jako nezbytné určení této maximální efektivní velikosti dopadového úhlu, tak aby byl proces soustružení co nejvíce ekonomicky výhodný. K zajištění takového úhlu dopadu by mohl být použit kromě pozice paprsku i náklon usměrňovací trubice.

V závěrečné experimentální části byla zhodnocena drsnost a kruhovitost obrobených vzorků. Drsnost povrchu se zvyšovala s narůstající postupovou rychlostí. Předpoklad, že se zvyšující se

frekvencí otáčení bude narůstat drsnost splněn nebyl. Nejvyšší hodnoty odchylky kruhovitosti byly zaznamenány u vzorku se čtvercovým průřezem, což odpovídá očekávání. Všechny hodnoty odchylek kruhovitosti nabývaly velikostí v řádu desetin milimetrů. U strojních dílů obráběných konvenčními metodami dosahují hodnoty kruhovitosti tisícín milimetru. Je možné, že takto velká hodnota odchylky kruhovitosti je způsobena nepřesným upevněním vzorku do čelistí soustruhu, popřípadě nepřesnostmi souvisejícím se soustruhem, každopádně pro praktické použití by bylo nutno provést konečnou úpravu povrchu vzorku.

Na závěr bych uvedl, že abychom byli schopni vytvořit analytický model soustružení abrazivním vodním paprskem, museli bychom provést řadu dalších experimentů souvisejících především s geometrickým nastavením procesu. Otázkou ale zůstává, jestli by tvorba takového modelu našla své použití. Doba soustružení vzorku oceli, s délkou dráhy 20 mm při hloubce záběru 0,5 mm, 9 bočních posuvů paprsku do materiálu, postupové rychlosti 20 mm/min, byla okolo deseti minut. Z literatury je patrné, že AWJT bylo použito pouze v případech, kde se konvenční třískové obrábění nevyplatí ať už z ekonomického důvodu (obrábění brusných kotoučů, kde je nízká životnost nože a použití AWJ se vyplatí jenom při započítání ceny za použité nože) nebo kvůli vlastnostem obráběného materiálu. Může se jednat například o kompozitní materiály. Vzhledem k omezenému využití metody bude zapotřebí posoudit, jestli není vhodnější pro jednotlivé aplikace použít statistické modely.

LITERATURA

- [1] Micro Abrasive Waterjet. *WatAJet*. <https://www.watajet.com/en/who-we-are.html>
- [2] KOVACEVIC, R. HASHISH, M., MOHAN, R., RAMULU, M., KIM, T. a E. GESKIN, State of the Art of Research and Development in Abrasive Waterjet Machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. ASME, 1997, 119(4), 776-785.
- [3] RABANI, A., MADARIAGA, J., BOUVIER, C., a D. AXINTE. An approach for using iterative learning for controlling the jet penetration depth in abrasive waterjet milling, *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 22, 99-107.
- [4] HASHISH, M. Turning With Abrasive-Waterjets - A First Investigation. *Journal of Engineering for Industry*. 1987, 109(4), 281-290.
- [5] GRANICK, M. S., POSNETT, J., JACOBY, M., NORUTHUN, S., GANCHI, P. A. a R. O. DATIASHVILI. Efficacy and cost-effectiveness of a high-powered parallel waterjet for wound debridement. *Wound Repair and Regeneration*. 2006, 14(4), 394-397.
- [6] WENZHUO, Y., TIEU, A., BAOLIN, R., DANIELS, B. a M. VIJAY. ENHANCING THE PERFORMANCE OF PULSED WATERJETS FOR VARIOUS INDUSTRIAL APPLICATIONS. In: *2007 American WJTA Conference and Expo*. 2007, 1-11.
- [7] AZHARI, A., SCHINDLER, Ch., KERSCHER, E. a P. GRAD. Improving surface hardness of austenitic stainless steel using waterjet peening process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012, 63(9-12), 1035-1046.
- [8] HLAVÁČ L. *Model pro řízení parametrů kapalinového paprsku při porušování materiálů v pevné fázi*. Ostrava, 2000. Doktorská disertační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [9] HLAVÁČ, L. Teoretický model abrazivního kapalinového paprsku. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava, Řada hornicko-geologická*. 2001, 47(1), 51-62.
- [10] HLAVÁČ, L. Investigation of the abrasive water jet trajectory curvature inside the kerf. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, 209(8), 4154-4161.
- [11] HLAVÁČ, L., HLAVÁČOVÁ, I., GERYK, V. a Š. PLANČÁR. Investigation of the taper of kerfs cut in steels by AWJ. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, 77(9-12), 1811-1818.
- [12] STRNADEL, B., HLAVÁČ, L. a L. GEMBALOVÁ. Effect of steel structure on the declination angle in AWJ cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2013, 64, 12-19.
- [13] HLAVÁČ, L., HLAVÁČOVÁ, I., PLANČÁR, Š., KRENICKÝ T., a V. GERYK. Deformation of products cut on AWJ x-y tables and its suppression. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, 307, 1-11.

- [14] MILES, P. a A. HENNING. A BETTER MEASUREMENT OF ABRASIVE WATERJET CUT SURFACE FINISHES. In: *2013 WJTA-IMCA Conference & Expo*. Houston, Texas, 2013, 1-16.
- [15] HLAVÁČ, L., HLAVÁČOVÁ, I., GEMBALOVÁ, L., KALIČINSKÝ, J., FABIÁN, S., MĚŠTÁNEK, J., KMEC, J. a V. MÁDR. Experimental method for the investigation of the abrasive water jet cutting quality. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, 209(20), 6190-6195.
- [16] HLAVÁČ, L., STRNADEL, B., KALIČINSKÝ J. a L. GEMBALOVÁ. The model of product distortion in AWJ cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012, 62(1-4), 157-166.
- [17] ANSARI, A. a M. HASHISH. Effect of Abrasive Waterjet Parameters on Volume Removal Trends in Turning. *Journal of Engineering for Industry*. 1995, 117(4), 475-484.
- [18] ZHONG, Z. a Z. HAN. Turning of glass with abrasive waterjet. *Materials and Manufacturing Processes*. 2002, 17(3), 339-349.
- [19] LIU, D., ZHU, HT., HUANG, CZ., WANG, J., a P. YAO. Prediction model of depth of penetration for alumina ceramics turned by abrasive waterjet—finite element method and experimental study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, 87(9-12), 2673-2682.
- [20] LI, WY., ZHU, HT., WANG J. a CZ. HUANG. Radial-mode abrasive waterjet turning of short carbon-fiber-reinforced plastics. *Machining Science and Technology*. 2016, 20(2), 231-248.
- [21] LI, WY., ZHU, HT., WANG, J., ALI Y. a CZ. HUANG. An investigation into the radial-mode abrasive waterjet turning process on high tensile steels. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013, 77, 365-376.
- [22] AXINTE, D.A., STEPANIAN, J.P., KONG M.C. a J. MCGOURLAY. Abrasive waterjet turning—An efficient method to profile and dress grinding wheels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009, 49(3-4), 351-356.
- [23] UHLMANN, E., FLÖGEL, K., KRETZSCHMAR M. a F. FALTIN. Abrasive Waterjet Turning of High Performance Materials. *Procedia CIRP*. 2012, 1, 409-413.
- [24] HLAVÁČEK, P., CÁRACH, J., HLOCH, S., VASILKO, K., KLICHOVÁ, D., KLICH J. a D. LEHOČKÁ. Sandstone Turning by Abrasive Waterjet. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015, 48(6), 2489-2493.
- [25] YUE, Z., HUANG, CZ., ZHU, HT., WANG, J., YAO, P., a Z. W. LIU. Optimization of machining parameters in the abrasive waterjet turning of alumina ceramic based on the response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, 71(9-12), 2107-2114.
- [26] HASHISH, M. Waterjet Machining of Advanced Composites. *Materials and Manufacturing Processes*. 1995, 10(6), 1129-1152.

- [27] CÁRACH, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., et al. Tangential turning of Incoloy alloy 925 using abrasive water jet technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, 82(9-12), 1747-1752.
- [28] MANU, R. a N. BABU. An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials. *Wear*. 2009, 266(11-12), 1091-1097.
- [29] NAG, A., ŠČUČKA, J., HLAVACEK, P., et al. Hybrid aluminium matrix composite AWJ turning using olivine and Barton garnet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, 94(5-8), 2293-2300.
- [30] HLAVÁČ, L. *Makroskopický fyzikální popis interakce kapalinového paprsku vysoké energie s materiálem*. Praha: České vysoké učení technické, Profesorské přednášky, 1, 2006.
- [31] FINNIE, I. Erosion of surfaces by solid particles. *Wear*. 1960, 3(2), 87-103.
- [32] HUMPHREY, J.A.C. Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1990, 11(3), 170-195.
- [33] FINNIE, I. Some reflections on the past and future of erosion. *Wear*. 1995, 186, 1-10.
- [34] ZOHOOR, M., ZOHOORKARI, I., CACCIATORE, F. a M. ANNONI. Influence of machining parameters on part geometrical error in abrasive waterjet offset-mode turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2014, 229(12), 2125-2133.
- [35] LI, WY., ZHU, HT., WANG, J. a CZ. HUANG. A Surface Roughness Model in Radial-Mode Abrasive Waterjet Turning for High-Tensile Steels. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, 483, 177-181.
- [36] MIZERA, O. Vliv vybraných parametrů měření na odchylku kruhovitosti. 2017. Diplomová práce. VŠB-TUO.